

Revisión bibliométrica del tratamiento de las aguas residuales mediante residuos frutales como medio de adsorción de colorantes: una visión global

Bibliometric Review of Wastewater Treatment Using Fruit Residues as a Means of Dye Adsorption: An Overview

 Rossember Saldaña-Escorcia¹;  Danilo Alfonso Piña-Velásquez¹

¹Universidad Popular del Cesar, Aguachica-Colombia

Correspondencia: rsaldanae@unicesar.edu.co

Recibido: 14 Abril 2025

Aceptado: 29 Agosto 2025

Disponible: 19 Septiembre 2025

Cómo citar / How to cite

R. Saldaña-Escorcia, and D. A. Piña-Velásquez, "Revisión bibliométrica del tratamiento de las aguas residuales mediante residuos frutales como medio de adsorción de colorantes: una visión global," *Tecnológicas*, vol. 28, no. 64, e3455, 2025. <https://doi.org/10.22430/22565337.3455>



Resumen

En la actualidad, la conservación de los recursos hídricos es un desafío importante. Por tal motivo, se ha intensificado el estudio de metodologías que no solo sean eficientes, sino que también sean económicamente viables para tratar aguas residuales de la industria textil. Este estudio tuvo como objetivo revelar el estado actual de la literatura científica relacionada con la utilización de los residuos frutales como medio de adsorción de colorantes en el tratamiento de las aguas residuales. La metodología empleada consistió en un análisis bibliométrico con base en los documentos indexados en Scopus® y publicados entre 2010 y 2022. Las tendencias trascendentales dentro del campo se determinaron utilizando redes por medio del software VOSviewer. Inicialmente, se encontraron 705 documentos y luego de aplicar los filtros se obtuvieron 532 documentos publicados durante el rango de búsqueda. Se encontró que China es el país predominante con el 38,72 % del total de las publicaciones. Asimismo, el autor Liu, Y. obtuvo el mayor número de citas seguido por Ren, S. y Yan, Q. Además, el promedio de citas por documento fue de 28,83, con un total de 2027 autores y una media de 3,81 autores por publicación. Por otro lado, *Chemosphere* fue la revista con mayor número de publicaciones seguidas de *Journal of Environmental Chemical Engineering* y *Water Science & Technology*. Los resultados permitieron obtener una visión amplia sobre el panorama investigativo del tratamiento de agua residuales utilizando residuos frutales como bioadsorbentes, lo cual sirve de base para futuras investigaciones. Finalmente, se concluye que los datos obtenidos orientan en cuanto autores, revistas, materiales, modelos matemáticos y uso de técnicas de caracterización más importantes. A pesar de ser un tema relevante, haciendo una búsqueda en la literatura, no se encontraron análisis bibliométricos sobre la temática. Es así como los análisis bibliométricos son una alternativa interesante a las revisiones literarias tradicionales.

Palabras clave

Análisis coste-beneficio, colorantes orgánicos, economía circular, remediación, residuos alimentarios.

Abstract

Currently, conservation of water resources is a major challenge. For this reason, research has intensified into methodologies that are not only efficient but also economically viable for treating wastewater from the textile industry. The objective of this study was to reveal the current state of scientific literature related to the use of fruit waste as a means of adsorbing dyes in wastewater treatment. The methodology used consisted of a bibliometric analysis based on documents indexed in Scopus® published between 2010 and 2022. Significant trends within the field were determined using networks through VOSviewer software. Initially, 705 documents were found and after applying the filters, 532 documents published during the search period were obtained. The study found that China is the leading country, accounting for 38.72% of all publications. Likewise, author Liu, Y. obtained the highest number of citations, followed by Ren, S. and Yan, Q. In addition, the average number of citations per document was 28.83, with a total of 2027 authors and an average of 3.81 authors per publication. On the other hand, *Chemosphere* was the journal with the highest number of publications, followed by the *Journal of Environmental Chemical Engineering and Water Science & Technology*. The results provided a broad overview of the research landscape on wastewater treatment using fruit waste as bioadsorbents, which serves as a basis for future research. Finally, it is concluded that the data obtained provide guidance on the most important authors, journals, materials, mathematical models, and use of characterization techniques. Despite being a relevant topic, a search of the literature reveals no bibliometric analyses on the subject. Thus, bibliometric analyses are an interesting alternative to traditional literature reviews.

Keywords

Cost benefit analysis, organic dyes, circular economy, remediation, food waste.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento constante de la población mundial ha provocado un aumento en el consumo de materias primas. Actualmente, la industria textil es una de las que presenta mayor demanda en el mercado. En consecuencia, se generan anualmente grandes cantidades de aguas residuales contaminadas con colorantes orgánicos (OC,) [1]–[3]. Sin embargo, estas poseen características inadecuadas para su vertimiento en sistemas acuáticos, como elevada demanda química de oxígeno (DQO), fuerte coloración, pH inapropiado y elevado contenido de sales [4], [5].

La presencia de OC en ambientes acuáticos puede afectar gravemente a los organismos vivos, debido a su toxicidad, capacidad de producir mutaciones genéticas e interferir en los procesos de fotosíntesis [6], [7]. Por tal motivo, durante los últimos años, se han estudiado diversos métodos para tratar las aguas residuales de la industria textil, tales como los procesos de oxidación avanzada, electrocoagulación, decoloración microbológica, filtración por membranas, procesos fotocatalíticos y adsorción [8]. Si bien todos estos métodos poseen ventajas y desventajas, el proceso de adsorción ha llamado la atención por su alta eficiencia y bajo costo [9].

En el proceso de adsorción de OC se emplean diversos materiales que demuestran resultados positivos en cuanto a capacidad de remoción, sin embargo, siguiendo los principios de la economía circular, se ha propuesto el uso de los residuos de frutas proveniente de la agroindustria como bioadsorbente de OC [10]. Los bioadsorbentes se han convertido en una opción de bajo costo por su facilidad de obtención, abundancia, menor impacto y capacidad de adsorción [11]. Los excelentes resultados en cuanto a capacidad de remoción están relacionados con la presencia de compuestos como la celulosa, la hemicelulosa y lignina, los cuales facilitan los procesos de atracción electrostática con el OC [12].

A pesar de que en la actualidad esta problemática ha tomado relevancia, aún son pocos los trabajos que muestran datos en forma de estadísticas para indicar el avance científico sobre el uso de los desechos agrícolas como bioadsorbentes a nivel global. Las revisiones bibliométricas son de gran importancia para la comunidad científica, ya que permiten obtener un panorama sobre las tendencias acerca un tema de interés durante un rango estimado de tiempo, lo cual se convierte en una herramienta para direccionar de mejor manera futuras investigaciones. No obstante, para el tratamiento de aguas con bioadsorbente, se evidenció una carencia de trabajos bibliométricos. Por lo tanto, en el presente artículo, se realizó un análisis bibliométrico

sobre el uso de residuos frutales como adsorbente de OC en aguas residuales, usando el software bibliométrico VOSviewer, con el objetivo de analizar y revisar las tendencias, perspectivas y desarrollo a través de datos estadísticos sobre la temática, para finalmente, plantear recomendaciones futuras que puedan dar un horizonte y/o base a los nuevos estudios.

Diversos estudios han abordado el uso de desechos agroindustriales como bioadsorbentes, por ejemplo, [13] realizó una revisión sobre el empleo de desechos agrícolas como adsorbente de colorantes proveniente de la industria textil, en el cual identificó los adsorbentes más apropiados para los distintos tipos de colorantes. Además, [14] publicó un trabajo de revisión donde analizaron los colorantes más estudiados y los diferentes bioadsorbentes sometidos a diversas modificaciones químicas. En dicho estudio se encontró que los OC más comúnmente empleados era los derivados de metilo, como el Azul de metileno (AM), el naranja de metilo (NM) y el rojo de metilo (RM), también se identificaron colorantes como el negro reactivo cinco (RB5) y el rojo de Congo en menor medida. De igual manera, en su estudio mostró como el empleo de la cáscara, semillas y hojas de las plantas, despiertan cada vez mayor interés como bioadsorbentes de OC debido a su abundancia, eficiencia y bajo costo; según el estudio, estos tienen potencial porque pueden ser usados directamente como se obtienen o con un tratamiento adicional. Por otro lado, [15] analizó el uso de material vegetal como adsorbente de OC de tipo aniónico provenientes de la industria textil. En el cual, se enfocó en mostrar la influencia de parámetros como el pH, el tamaño de partícula y la temperatura sobre la capacidad de adsorción. Asimismo, realizó un análisis comparativo entre los carbones activados y materiales modificados químicamente con compuestos catiónicos. Además, [16] presentó una revisión sobre el uso de diversos desechos agrícolas en el tratamiento de soluciones con rodamina B. En este, destaca la importancia de los adsorbentes elaborados a partir de desechos agrícolas, resaltando su aporte a la economía circular. Además, se identificó que el mayor porcentaje de adsorción del 98 % correspondió a un carbón activado a base de desechos de la producción de azúcar blanca.

El análisis bibliométrico permite verificar en la literatura de forma exhaustiva sobre un tema específico teniendo en cuenta bases de datos globales, con el objetivo principal de brindar una perspectiva clara que permita a investigadores orientar futuros trabajos [17]. En especial, en un análisis bibliométrico se tiene en cuenta datos como número de citas, temas, palabras claves, países y poblaciones. Bases de datos científicas como Web of Science (WoS), Scopus o softwares bibliométricos como VOSviewer, Leximancer y Gephi, permiten observar a través de datos cuantitativos las tendencias generales de un tema a investigar, por lo tanto, en los últimos años se ha popularizado entre la comunidad científica su uso [18]. Aunque el análisis bibliométrico ha comenzado a ser utilizado por la comunidad científica en diferentes áreas, son relativamente pocos los reportados en la literatura, y específicamente, no se han realizado estudios bibliométricos para el tratamiento de aguas residuales utilizando desechos agrícolas.

2. METODOLOGÍA

2.1 Fuentes de datos y criterios de selección

La bibliografía disponible para el análisis se recuperó de la base de datos especializada Scopus® - Elsevier BV, siendo considerada una de las plataformas referenciales con mayor cobertura [19], [20]; permitiendo así la disminución en el sesgo generada por la búsqueda de la información [21]. El período de búsqueda fue el 31 de mayo de 2023 y se empleó el siguiente algoritmo: "*Fruits*" AND "*Adsorption*" AND "*Wastewater*" AND "*Dyes*". La búsqueda arrojó 705 publicaciones, a los cuales se le aplicó los criterios de inclusión; siendo estos: (1) incluir artículos científicos y revisiones, (2) rango de tiempo de publicación entre 2010 a 2022, y finalmente, (3) no se limitó el idioma, país o categoría de datos; obteniendo así un resultado final para el análisis (Figura 1). Los datos fueron descargados en archivos de citas de sistemas de

información de investigación “RIS” el cual contenía la información completa y referencias citadas.

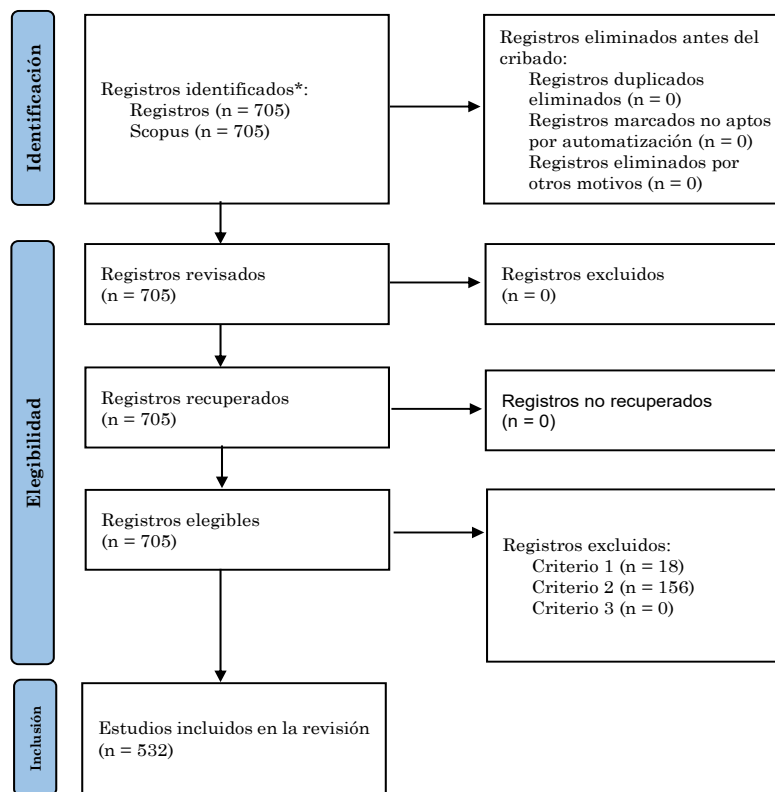


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA. Fuente: elaboración propia.

2.2 Análisis de los datos

Se utilizó el software VOSviewer (Versión 1.6.18) con el propósito de representar la relación entre las palabras claves, autores y países mediante redes bibliométricas basadas en la metodología propuesta por Ludo Waltman y Nees Jan van Eck, la cual aplica la medida de similitud como índice de proximidad [22]–[24]. Este software muestra ventajas en la representación visual del conocimiento cartográfico, específicamente, en la agrupación de este [17]. Las redes estructuradas servirán para el análisis de coautoría, coocurrencia y citas, es decir, se analizó la coocurrencia de las palabras claves (se utilizó el 14 como número mínimo de apariciones de una palabra clave para estructurar el mapa), así como las coautorías entre los países (condiciones limitantes, que el número máximo de países por documentos fuera de 20, que el número mínimo de documentos publicados por países fuera 2 y finalmente, el número mínimo de citas por país sea 10) e investigadores (limitantes, que el número de autores máximo por publicación fuera de 20 y que por lo menos, los autores hayan publicado 4 artículos), y en último lugar, se analizó las revistas con mayor impacto en términos de citaciones. Estas redes obtenidas por medio del análisis de los nodos y el tamaño de estos están enmarcadas por la fuerza total del enlace mientras que la densidad de la línea que enlaza los nodos está relacionada con la fuerza del enlace. Por otro lado, el número de clústeres que se perciben en las redes está estipulado por la resolución; cuanto mayor sea su valor, mayor es el nivel del detalle de estos [24].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Publicaciones en el tiempo

Se identificaron un total de 532 publicaciones dentro de los criterios establecidos para la búsqueda de literatura científica base para el análisis bibliométrico. En la Figura 2 se muestra el número de publicaciones dentro del periodo determinado, al igual que el número total de citas por año. En los dos primeros años, se observa un incremento en el número de publicaciones dado el interés por utilizar adsorbentes de bajo coste, coincidiendo con lo destacado por [25] y [26], donde se analizaron la capacidad de diferentes adsorbentes alternativos reportados en la literatura, entre ellos, el papel que tenían los tejidos vegetales en la remoción de colorantes en el tratamiento de aguas residuales.

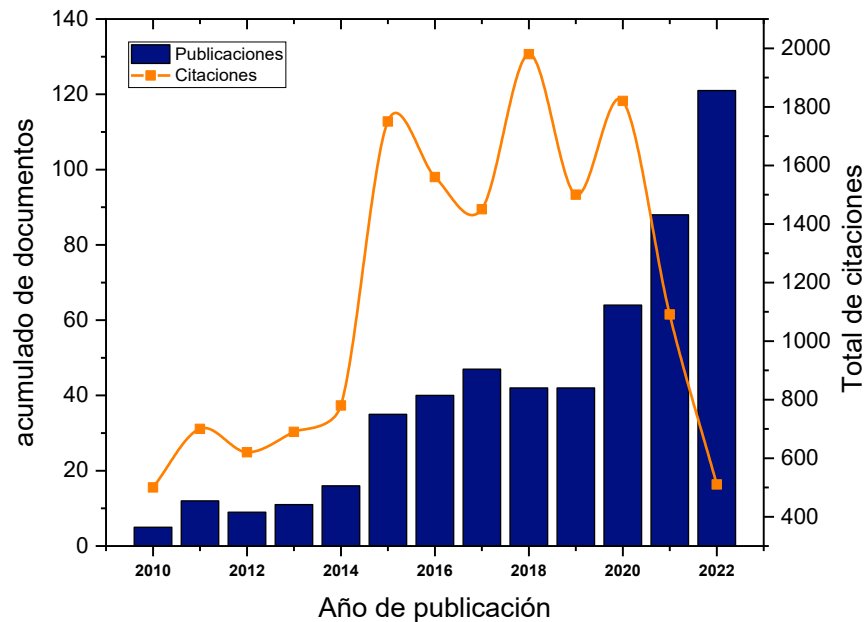


Figura 2. Acumulación de publicaciones y número de citas entre 2010 - 2022.
Fuente: elaboración propia.

En el rango de tiempo comprendido por el año 2010 hasta el año 2014, se evidenció que el número de publicaciones alcanzó un máximo de 300 por años, esto puede estar relacionado a un crecimiento conservador y un predominante uso de metodologías como la extracción por solventes, evaporación, filtración por membranas y electroquímica [27]. A partir del 2015, se percibe un incremento significativo de las publicaciones con una variación pequeña en la pendiente de documentos publicados, que coincide con el planteamiento de los 30 objetivos de desarrollo sostenible por parte de la Organización de Naciones Unidas (ONU) [28]. Cabe resaltar que los cambios significativos en la pendiente de acumulación de documentos publicados se marcan entre los períodos 2013 al 2017 y 2018 al 2022, demostrando el interés y la relevancia de este campo específico [29]. Posteriormente, el 2022 es el año con mayor número de publicaciones (23,87% de la producción total) dejando ver el aumento en la tendencia del campo, en el cual se buscan materiales filtrantes naturales para reducir los costos operativos en los tratamientos convencionales y que no tengan efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana [30]. Finalmente, el promedio de citas por documento fue de 28,83, con una cantidad de 2027 autores en total con una media de 3,81 autores por publicación.

3.2 Distribución por países

Los resultados obtenidos en el análisis bibliométrico enfocado a los países relacionados con la publicación de la temática muestra que 64 países han publicado documentos científicos y académicos sobre la utilización de los residuos frutales como medio de adsorción de colorantes en el tratamiento de las aguas residuales, de los cuales, el 76,56 % de estos ha contribuido con menos de 10 documentos inéditos. En la Tabla 1, se puede apreciar sobre los 10 países con mayor publicación, donde China puntúa en la publicación de artículos (206 documentos, 38,72 % del total) y 5.495 citas. Otros países que también se han centrado en este campo son India (17,48 %), Malasia (7,58 %), Arabia Saudí (5,64 %) e Irán (5,26 %). Estos son acordes con el desarrollo industrial de países como China e India, en los cuales la industria textil y de alimentos es fundamental para su economía. Por ejemplo, según datos, la industria textil en China tuvo un aumento cercano al 3 % en el periodo comprendido entre el año 2016 al 2019 [31]. Sin embargo, esto también desencadena una mayor cantidad de residuos sólidos y líquidos generados que necesitan ser tratados antes de ser descartados.

Tabla 1. Principales países que publican la temática. Fuente: elaboración propia.

SCR	País	TP	H	Citas promedio por documento
1	China	206	1112	26,67
2	India	93	745	25,67
3	Malasia	40	415	32,68
4	Arabia Saudita	30	478	28,10
5	Irán	28	416	30,14
6	Pakistán	26	353	41,31
7	Brasil	19	690	33,05
8	Turquía	19	535	18,84
9	Corea del Sur	15	810	48,27
10	Australia	14	1193	47,93

SCR: *Standard competition ranking*; TP: Número total de documentos; H: H-Index.

De igual forma, en la Figura 3 se visualiza la superposición de los 43 países con mayor publicación incluidos el top 10 de la clasificación. Estos países están vinculados en función de citas y cooperación en el desarrollo del campo de investigación; lo cual permitirá que los académicos y científicos formen nuevas colaboraciones aumentando el conocimiento del campo y la producción conjunta de enfoques, así como artículos publicados [32], [33]. El tamaño de los círculos se encuentra China siendo el país líder en publicaciones independiente de su colaboración internacional corroborando la información de la Tabla 1. Asimismo, se muestra que India es el Estado y/o Nación con mayores redes, colaborando con 19 países, seguido de Malasia ($n = 15$) y China ($n = 11$). Lo anterior tiene concordancia con el papel de la industria alimentaria y sobre todo la producción de frutas en estos países, lo que conlleva a una explotación del potencial de estos residuos en la solución de problemáticas de tratamientos de agua residuales usando el método de adsorción física. En el caso de la India está entre los 3 países con mayor producción de frutas y verduras en el mundo, teniendo una producción superior a los 300 millones de toneladas [34]. Por lo tanto, se puede entender su importancia en la colaboración científica sobre la temática.

Del mismo modo, la Figura 5 expone que la producción sobre la utilización de los residuos frutales como medio de adsorción de colorantes en el tratamiento de las aguas residuales ha tomado relevancia entre los autores desde el 2015 aproximadamente, resaltando así la actualidad y relevancia que posee la premisa en la actualidad. Finalmente, se interpreta que los autores como Wang, Z; Gao, p; Yang, H, Du, L; así como Yang, J son los últimos en publicar sobre la temática.

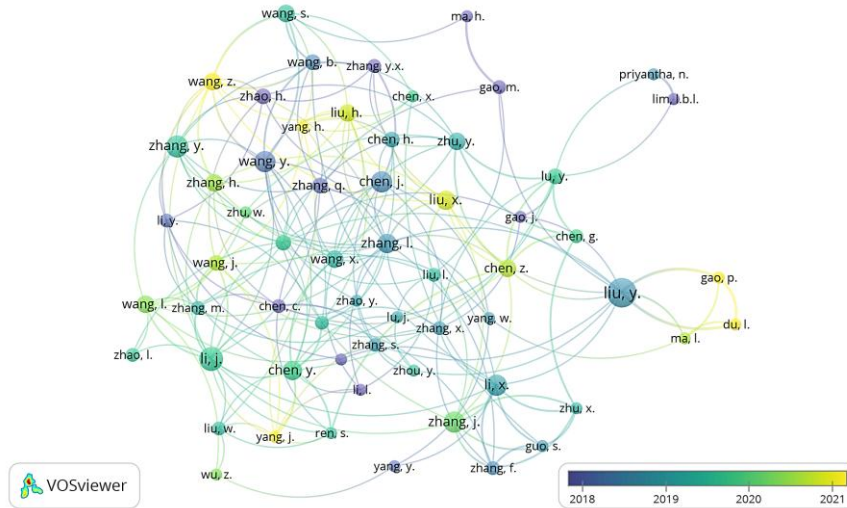


Figura 5. Visualización de la red de autores dentro de la línea de tiempo. Fuente: elaboración propia.

3.4 Análisis de las revistas

En la Tabla 2 se enumeran las 10 revistas con mayor número de publicaciones acerca de la temática indagada. Según esto, 22 de los 532 artículos fueron publicados Chemosphere (n = 22) una revista científica especializada en el campo del cuidado del medio ambiente con enfoque en el análisis de contaminantes presentes en cuerpos hídricos y sus metodologías de tratamiento, siendo la fuente con mayor cantidad de publicaciones, posiblemente la opción más destacada para que los científicos compartan sus artículos sobre temas relacionados a transformaciones químicas [36]; seguidos de *Journal of Environmental Chemical Engineering* (n = 18) y *Water Science and Technology* (n = 14).

Tabla 2. Principales revistas según el número de publicaciones. Fuente: elaboración propia.

No.	Revista	TP	SJR2021	Q	H	País
1	<i>Chemosphere</i>	22	1,51	1	265	Reino Unido
2	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	18	1,04	1	90	Reino Unido
3	<i>Water Science and Technology</i>	14	0,45	2	145	Reino Unido
4	<i>Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects</i>	13	0,76	2	179	Países Bajos
5	<i>Desalination and Water Treatment</i>	12	0,24	3	67	Estados Unidos
6	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	12	1,99	1	307	Países Bajos
7	<i>Water, Air, and Soil Pollution</i>	11	0,55	2	118	Países Bajos
8	<i>Chemical Engineering Journal</i>	11	2,42	1	248	Países Bajos
9	<i>Applied Surface Science</i>	11	1,15	1	204	Países Bajos
10	<i>RSC Advances</i>	11	0,67	1	167	Reino Unido

SJR: Scientific Journal Ranking; TP: Número total de documentos; Q: Cuartil, H: H-Index.

De esta forma, y de acuerdo con *Scientific Journal Ranking* (SJR) [37], ochos de las revistas posee un índice H > 100 al igual que seis se encuentran en el Cuartil 1. Las características anteriores muestran el nivel de relevancia, impacto y calidad científicas de las revistas. De igual forma, se puede observar que Países Bajos y Reino Unido poseen el mayor número de revistas que publican sobre la temática en cuestión.

3.5 Análisis de las instituciones

Los resultados del análisis conciernen a 1234 instituciones y/o centros académicos, de los cuales el 79,74 % aportaron menos de un artículo publicado. Como se esperaba según los resultados del Cuadro 1 y la Figura 2 las instituciones de China son las de mayor producción. Las 20 instituciones principales se muestran en la Figura 6, correspondiendo al 31,4 % de las publicaciones totales sobre el tema. El Ministerio de educación de China ocupa el primer lugar (35 publicaciones, 6,58 % del total), seguida de la Universidad de King Saud y la Universidad del Chongqing que ocupan el segundo y tercer lugar con 12 publicaciones cada una.

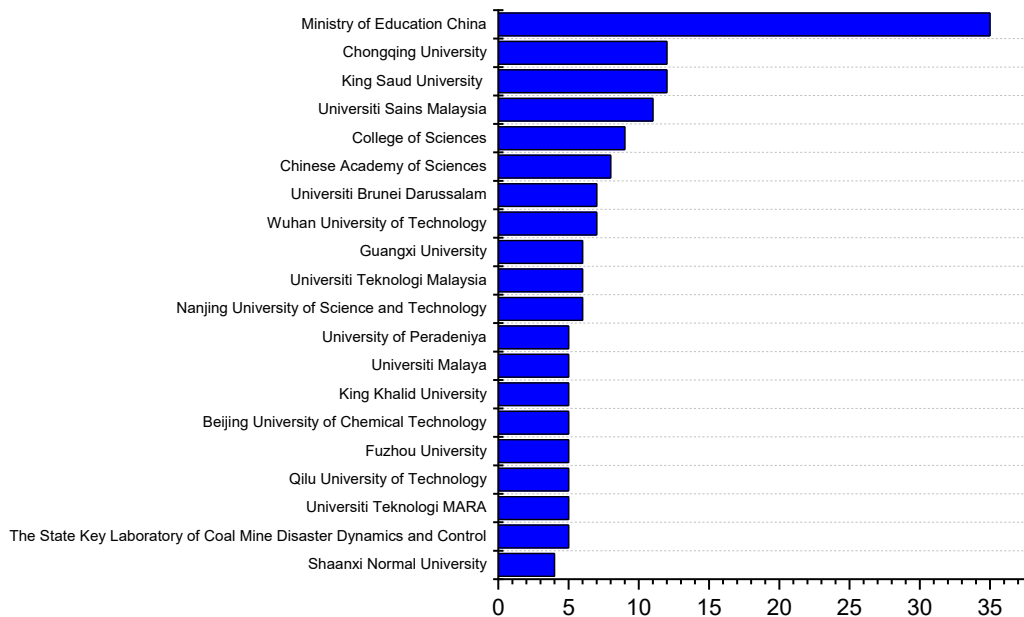


Figura 6. Red de colaboración entre instituciones. Fuente: elaboración propia.

3.6 Artículos más citados

En cuanto a los estudios más referenciados en el tratamiento de las aguas residuales mediante residuos frutales como medio de adsorción de colorantes, se destacan los diez principales según la cantidad de citas que han recibido. En primer lugar, se encuentra un artículo con 510 citas, [38] se centró sobre la adsorción del colorante violeta de cristal (CV) por la cáscara de pomelo (GFP), que tiene potencial de aplicación en la remediación de aguas residuales contaminadas con colorantes utilizando un residuo sólido generado por la industria de jugos de frutas cítricas demostrando que la GFP tiene el potencial de aplicación como un adsorbente eficiente para la eliminación de CV de soluciones acuosas. En segundo lugar, con 334 citas, este estudio indagó sobre la utilización de adsorbentes económicos y respetuosos con el medio ambiente, disponibles de manera natural, para eliminar colorantes peligrosos de desechos líquidos mediante procesos de adsorción. Se presentó una lista compilada de adsorbentes asequibles, fácilmente accesibles, seguros de manipular y simples de desechar. Estos adsorbentes se agrupan en cinco categorías distintas según su disponibilidad: (1) desechos agrícolas e industriales, (2) residuos de frutas, (3) residuos vegetales, (4) materiales

inorgánicos naturales y (5) bioadsorbentes. Algunos de estos adsorbentes han demostrado una capacidad de adsorción eficaz para varios colorantes, si bien este proceso está altamente influenciado por el pH del medio y su nivel juega un papel crucial en el tratamiento [39].

Seguidamente, [40] se centraron en analizar los diferentes adsorbentes ecológicos empelados para el tratamiento de las aguas residuales en relación con los colorantes; metales pesados; fenoles; pesticidas y productos farmacéuticos. La búsqueda para la revisión se basó en residuos agrícolas y subproductos (frutas, verduras, alimentos); residuos y desechos agrícolas, así como fuentes de bajo costo (carbón activado derivados de pirólisis de residuos agrícolas). Los autores discutieron aspectos como la capacidad de adsorción de los materiales donde indican que corteza de madera de té y las semillas de papaya tiene alta capacidad de adsorción del Azul de metileno, así como el cactus tuno (cladodios) para el azul de metileno, el Eriochrome Black T y el Alizarin S; mientras que el azolla tratada para metales como Pb, Cd, Cu y Zn. Además, la cáscara de arroz modificada para el parquet (pesticida), al igual que el modelado cinético dejando en claro que actualmente se emplean las ecuaciones de Langmuir, Freundlich y la combinacional Langmuir-Freundlich (LF) para ajustar los datos de equilibrio experimental. De igual manera, resaltan el uso de ecuaciones de Lagergren y de pseudosegundo orden bajo modelos de Elovich, Intrapartícula y McKay para ajusten en la cinética de adsorbentes de bajo costo.

Asimismo, el artículo de revisión [41] con 210 citas, indagó sobre la utilización de los desechos de banano como medio adsorbente de contaminantes solubles en agua como tintes, metales pesados, pesticidas, aceites, compuestos orgánicos, etc. Indicaron que los residuos llevados a carbones activos (química o térmica) poseen mayor capacidad de adsorción que sin activación, resaltando que Cáscara de plátano activada (AC) tienen alta capacidad para disminuir el azul de metileno al igual que al naranja II, sin embargo, aclaran que la forma del residuo (cáscara, médula, tallo, hoja, pseudotallo) tiene influencia en el tipo de colorante al que es efectivo.

Por otro parte, con 175 citas, [42] emplearon un biocarbón de cáscara de lichi a partir de la carbonización hidrotermal y un proceso de activación en horno de mufla, fue empleado en la adsorción de rojo Congo (CR) y verde malaquita (MG). Los autores resaltan que el biocarbón alcanza una eficiencia del 98 % en la adsorción del mg, debido a su alta área de superficie específica, gran volumen microporoso y a la interacción electrostática dependiendo del pH, para este caso, $\text{pH} > 2$ (superficie cargada negativamente).

Con 163 citas, en el sexto lugar, se centraron en la utilización de cáscaras de residuos agrícolas, específicamente, plátano, papa y pepino en la adsorción de colorantes catiónicos (azul de metileno) y aniónicos (naranja G) en aguas residuales. Los autores emplearon ATR-FTIR, sorción de N_2 , SEM y XRD como técnicas de caracterización del material, a partir de esto, emplearon los bioadsorbentes destacando que la cáscara de plátano (BP) y la cáscara de pepino (CP) posee una alta capacidad de adsorción de azul de metileno ($\text{pH} \geq 6$) mientras que la cáscara de pepino (CP) es el biosorbente más eficaz para el colorante aniónico ($\text{pH} = 2$).

La revisión [43] con 152 citas, la cual sintetizó los procesos de obtención del material, caracterizaciones y utilización de bioadsorbentes provenientes de residuos de frutas para la eliminación de varios contaminantes del agua. Los autores destacan que la combinación de pirólisis con activación química, específicamente con KOH o H_3PO_4 son más eficientes para aumentar la capacidad de adsorción; esto se debe a que aumentan el área superficial ($>800 \text{ m}^2/\text{g}$), desarrollan una estructura porosa óptima e incorporan los grupos funcionales activos favorables para el proceso de adsorción. Además, indican el potencial de bioadsorción de la cáscara de cola activada con ZnCl_2 y Cáscara de fruta de Karanj a 323 K en relación con el azul de metileno al igual que la semilla *Litsea* glutinosa llevada a carbón activado con NaHCO_3 . En octavo lugar, encontramos [44], donde indagaron la implementación de la cáscara de sandía como bioadsorbente de tintes y metales pesados de aguas residuales. Destacan que la adsorción del colorante y/o tinte depende de las características del proceso, indicando que bajo la vía de activación química (ZnCl_2 , H_2SO_4 , H_3PO_4 , KOH para aumentar la porosidad y reactividad superficial), en temperatura entre 25–30 °C y bajo pH controlado para colorantes

conformado por 66 ítems o términos relacionados fuertemente con las frutas cítricas, los colorantes azoicos, dado a que adsorbentes basados en estas muestran una alta capacidad de remoción de los colorantes mencionados [47]. Para comprender mejor la interacción entre los adsorbentes y los colorantes, así como para caracterizar la estructura y composición de los materiales, se emplean técnicas analíticas como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la difracción de rayos X (XRD). Estas técnicas permiten estudiar la naturaleza de los enlaces químicos, la morfología de los materiales y su estructura cristalina, lo que contribuye a entender el mecanismo de adsorción y optimizar el proceso para la eliminación eficiente de los colorantes azoicos [48].

El grupo verde tiene 62 palabras claves, el cual relaciona la adsorción de los colorantes, metales y compuestos aromáticos en el tratamiento de agua residuales a través de la bioadsorción y carbón activado extraído de frutas, dado a que en los últimos años se han investigado la utilización de materiales de bajo costo, como residuos agrícolas o subproductos de la industria alimentaria, para eliminar contaminantes del agua provenientes de las industrias textiles [49]. Además, indica una relación el modelo de adsorción de Langmuir y los análisis termogravimétricos; ya que se utilizan para describir cómo se distribuyen y se adhieren los contaminantes en el adsorbente [40], así como para estudiar las propiedades físicas y químicas del adsorbente, como su estabilidad térmica y su contenido de materia orgánica [43]. Estos análisis ayudan a comprender mejor el comportamiento del adsorbente durante el proceso de adsorción y a optimizar las condiciones de tratamiento de aguas residuales [50].

De la misma manera, el tercer grupo "azul" se enmarca en la cinética de la adsorción, el equilibrio isotérmico o en la modificación química de los procesos de generación de los adsorbentes en busca del perfeccionamiento de los estudios experimentales con aguas industriales y residuales o soluciones acuosas para la remoción de contaminantes o de los compuestos azoicos por medio de la biorremediación empleando biocarbón generado de residuos frutales [51]–[53]. De igual forma, este clúster es afín a las técnicas de pirólisis, termogravimetría, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier o con influencia de la termodinámica para comprender mejor los procesos de adsorción y remoción de contaminantes, así como para optimizar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales [47], [54].

Finalmente, el cuarto grupo lo conforman 19 ítems, acoplando la capacidad y perfeccionamiento de la cinética enzimática dentro de la adsorción de colorantes aniónicos o azoicos por vía de atracciones electrostáticas comprendiendo los parámetros termodinámicos bajo los modelos cinéticos de pseudo-segundo orden y de difusión intraparticular. Esto se debe a que la atracción electrostática facilita la interacción entre el adsorbente y el colorante, aumentando la eficiencia de la adsorción [55]. Además, al comprender los parámetros termodinámicos, como la entalpía, la entropía y la energía libre de Gibbs, se puede optimizar el proceso de adsorción para maximizar la capacidad de remoción del colorante [56]. De igual forma, los modelos cinéticos de pseudo-segundo orden y de difusión intraparticular permiten entender la velocidad de adsorción y el mecanismo de transferencia de masa durante el proceso, lo que contribuye a mejorar la eficacia del tratamiento de aguas contaminadas con colorantes aniónicos o azoicos [57].

3.8 Limitaciones y fortalezas del estudio

El análisis bibliométrico permite exponer las publicaciones científicas y académicas, tales como artículos, libros y capítulos de libro de forma estructurada de fácil comprensión con la finalidad de reconocer información relevante sobre temáticas actuales en los campos del conocimiento [58]. Este análisis permitió establecer los avances en investigación sobre la utilización de los residuos frutales como medio de adsorción de colorantes en el tratamiento de las aguas residuales. No obstante, es esencial resaltar que, a pesar de la originalidad de esta revisión bibliométrica y los resultados significativos obtenidos, este análisis no carece de limitaciones. Principalmente, esto se debe a que no se examina el contenido específico de las

publicaciones, sino que se centra en un análisis cuantitativo de la producción científica evaluada. Además, este trabajo presenta las limitaciones inherentes a los estudios bibliométricos, como la elección de la base de datos, las cadenas booleanas seleccionadas, la estandarización manual llevada a cabo y los parámetros bibliométricos utilizados para analizar las publicaciones seleccionadas [59], [60].

3.9 Brecha en el área de investigación de interés

A pesar del rápido desarrollo del campo en la utilización de residuos frutales como medio de adsorción de colorantes en el tratamiento de las aguas residuales, aún existen desafíos o vacíos en el campo que se deben abordar. En esta sección, basándose en los resultados del análisis de co-ocurrencia de las palabras claves y la revisión de los artículos publicados en los últimos años, se analizan brechas que puedan impulsar las líneas de investigación actuales y futuras.

3.9.1 Reutilización y/o regeneración del adsorbente

A medida que avanzan las investigaciones sobre la remoción de colorantes en las aguas residuales a partir de adsorbentes derivados de residuos frutales o agrícolas, este proceso presenta una creciente preocupación dado a que los adsorbentes después de un tiempo específico pierden la capacidad de adsorción derivado de las concentraciones retenidas en la superficie del mismo [61], lo que disminuye la sostenibilidad ambiental y económica. Estudios como [62], emplearon ácido clorhídrico (HCL a 0,1M) y acetona (75:25) para regenerar la capacidad de adsorción del carbón activado derivado sulfonado de residuos de cáscara de granada (S-PPAC) modificado con sal sódica, el cual fue reutilizado en tres ciclos consecutivos disminuyendo su capacidad en el cuarto y quinto ciclo (86 % y 67 %). De igual manera, [63]–[66] destacaron el uso de disolventes como ácidos (HCl, HNO₃) y bases (NaOH) resultan efectivas en la desorción de colorantes, sin embargo, la eficiencia del adsorbente disminuye ciclos después. Además, el método de regeneración emplea solventes orgánicos que pueden tener impactos ambientales. Asimismo, [67] utilizaron una solución acuosa con naranja de metilo (OM) con agitación durante 180 minutos para la desorción del carbón activado H₃PO₄ derivado de pulpa de bagazo de caña de azúcar, no obstante, en el proceso de reutilización del material perdió la capacidad de adsorción pasando del 85,7 % al 50 %.

Por otro lado, [61] indagaron la importancia de la recuperación carbón activado al igual que los procesos empleados, destacando que la oxidación electro-Fenton heterogénea es la técnica dentro de los procesos oxidativos avanzados más efectiva en la regeneración de la adsorción del material (>90 %), esto se debe a que permite la mineralización de los contaminantes orgánicos recalcitrantes y genera radicales hidroxilo, así como no requiere de químicos adicionales como peróxidos, y por último, este proceso mantiene la integridad estructural del material (área superficial, distribución de poros y capacidad de adsorción) permitiendo reutilizar el carbón activado en múltiples ciclos con eficiencia. [68] emplearon el NaCl, MgCl₂ y CaCl₂ (0,1 y 0,5 M) para regenerar el carbón activado de cáscaras de kiwi, donde el MgCl₂ a 0,1 M con un tiempo de contacto de 60 minutos y el pH de 5,5; mostró mejores resultados en el aumento de la capacidad de adsorción del material, puesto que después de 10 ciclos la eficiencia de adsorción fue alta. A partir de esto, es fundamental comprender los factores que afectan los procesos de desorción de contaminantes puesto que las brechas en el campo están relacionada a la durabilidad, la eficiencia a largo plazo, los costos y los impactos ambientales involucrados en los mecanismos de regeneración [69]. Para avanzar en este campo, es fundamental que se aborden los desafíos, pero más que nada, se logre estandarizar los procesos y pruebas de regeneración. Además, la mayoría de los ensayos son llevados a cabo en condiciones pilotos de laboratorio donde no se refleja la complejidad de las aguas residuales complejas reales (urbanas, industriales o agrícolas) como lo indica [70], donde emplearla a mayores escalas implica retos técnicos y económicos.

3.9.2 Análisis tecno-económico y sostenibilidad

En la actualidad, los artículos publicados apenas muestran intentos limitados de análisis tecno-económico y sostenibilidad [71]. Varias investigaciones muestran este intento, tal como [67], los cuales estiman un costo de producción aproximado de \$27,14 con una eficiencia de adsorción del 99,1 %. No obstante, se debe tener en cuenta que los autores no adicionaron los costos derivados de la regeneración del adsorbente ni el reciclaje del solvente, siendo estos desafíos económicos adicionales. [15] y [72] nos indican que los costos implicados en la obtención del adsorbente derivado de residuos agrícolas y su regeneración se aproximan a los \$42.5/kg en comparación del carbón activado comercial con un costo estimado de \$111.4/kg. Además, resaltan que la utilización de biomasa agrícola como materia prima contribuye a la reducción de residuos depositados en los rellenos sanitarios al igual que la mayoría de adsorbentes generados a partir de biomasa son biodegradables al final de su vida útil, pero teniendo en cuenta la neutralización de los compuestos químico o tóxicos.

En el estudio [73], determinaron la viabilidad financiera del bioadsorbentes de fibra de coco modificado con NaOH, la producción estimada fue de \$481874 con un precio de venta de \$95 por tonelada indicando ventas anuales de \$684000, un beneficio neta de \$141118 y una rentabilidad sobre la inversión del 39,49 %, así como un periodo de retorno de la inversión de 2,95 años y un punto de equilibrio de 43,16 %; destacando que dicho adsorbente es una solución económica y ambientalmente sostenibles para reducir el impacto de los contaminantes en el agua residual. De igual manera, [74] analizaron los costos implicados en el desarrollo del adsorbente de cáscara de durian para la remoción de Marrón Básico 16, donde resaltaron que el costo específico de \$172.71 por tonelada siendo de más bajo costo que el carbón activado cáscaras de melón dulce (\$261.81 por tonelada). Asimismo, los autores indicaron ingresos anuales por venta de \$62834 basados en una capacidad de producción anual de 240 toneladas de adsorbente, un costo operativo anual de \$11960 y una rentabilidad anual de \$41499; una eficiencia de inversión de 45.62 % y un periodo de retorno de 10 años. Finalmente, [75] y [76] describen el análisis económico de varios adsorbentes (cáscara de coco, cáscara de maní y cáscara de arroz) para la captura de colorantes básicos, especialmente, para el rojo básico 09; estimando costos de \$0.055, \$0.011 y \$0.012 por gramo de adsorbente generado; donde el adsorbente derivado de la cáscara de maní mostró mayor capacidad de remoción y menor costo de producción aumentando la viabilidad económica para procesos de mayor escala en la eliminación de colorantes en aguas residuales.

A pesar de esto, el aumento de los costos e inversiones en el tratamiento de las aguas residuales y la gestión de los efluentes genera preocupación por la sostenibilidad económico-ambiental [77]. La recuperación de los adsorbentes al igual que los colorantes puede impulsar la viabilidad de los procesos, así como la reducción en el consumo desmedido de agua y contaminantes. Las aguas residuales que contienen, especialmente, colorantes y sustancias peligrosas requiere de tratamientos más especializados y, por ende, una mayor inversión financiera puesto que dependen de factores como equipos o ajusten en las plantas, catalizadoras y gastos operativos.

3.9.3 Exploración en contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes son sustancias químicas o biológicas que representan un riesgo potencial para la salud pública y los ecosistemas, especialmente los acuáticos, y que no son monitoreados comúnmente [78]. Estos se presentan en bajas concentraciones, su persistencia y efectos acumulativos generan preocupación en la actualidad [79]. Los contaminantes emergentes incluyen microplásticos (MP), colorantes, pesticidas, químicos disruptores endocrinos (EDC), productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCP), retardantes de llama y nanomateriales [79]. La investigación de contaminantes emergentes se centra en la adsorción de antibióticos a partir de carbón activado (CA) comerciales y producido

para la remoción de bisfenol A (BPA), amoxicilina (AMX) y paracetamol (PCM) como lo demuestran [80]–[82], no obstante, el elevado costo y dificultad de regeneración impulsan la búsqueda de alternativas más sostenibles. Del mismo modo, [83]–[85] han empleado los biocarbones derivados de residuos agrícolas como las cáscaras, tallos y lodos, modificados y no modificados para la adsorción de BPA, clortetraciclina, sulfametoxazol (SMX), tetraciclina (TC), cefradina, ciprofloxacino (CIP) y atrazina (ATZ); un estudio [86] reportó la comparación de biocarbones basados de la cáscara de naranja y cáscara de maní para la adsorción de antibióticos (tetraciclina (TC), sulfametoxazol (SMZ) y amoxicilina (AMC)) mostrando gran relevancia en la remoción de TC bajo el tratamiento con KMnO_4 .

Asimismo, en diferentes estudios [87]–[89], se han empleado los biocarbones para la adsorción y remoción de tintes los cuales han demostrado una alta capacidad para el azul de metileno, verde malaquita, violeta cristal y el rojo Congo; pero deben ser activados bajo procesos químicos (con KOH , NaOH , H_3PO_4 , Fe/Mn , CuNO_3 , entre otros), adición de nanopartículas (como Fe_3O_4 , ZnO , $n\text{ZVI}$), con el fin de aumentar la porosidad y la funcionalidad superficial [90], [91]. Finalmente, investigaciones como [92]–[94] han reportado la aplicación de biocarbón magnético (Zn , mg) o filtros con biocarbón activado derivados de diversas fuentes de biomasa como bagazo de caña de azúcar, paja de maíz, celulosa, serrín, corteza de pino y abeto en la adsorción de MP, especialmente, microesferas de poliestireno, microperlas de PE, PLA-MP (biodegradables) y microplásticos de polihidroxialcanoato (PHA-MP). En el contexto del crecimiento demográfico y, por ende, los volúmenes de contaminantes emergentes generados, se puede observar la baja aplicación de los residuos frutales en la generación de bioadsorbentes para la remoción de los mismos. Del mismo modo, en las investigaciones los modelos experimentales son variados, con diferencias significativas ya sea en condiciones del medio (pH, temperatura, fuerza iónica, grupos funcionales), la dosificación y/o concentraciones iniciales de los contaminantes, el tiempo de contacto o el método de agitación haciendo difícil la comparación directa de la eficiencia de los bioadsorbentes, y obtener con claridad los parámetros óptimos generales [91]–[95].

3.9.4 Implicaciones prácticas y teóricas

Al examinar el análisis bibliométrico en el campo sobre de la utilización de residuos frutales como medio de adsorción de colorantes en aguas residuales ofrece aportes significativos permitiendo consolidar el área de estudio, se puede observar que los hallazgos permiten expandir los conocimientos, especialmente, en los procesos de adsorción física y química a través de modelos isotérmicos aplicados como Langmuir, Freundlich y la combinación de estos “Langmuir-Freundlich”. De igual manera, modelos cinéticos que van desde pseudo-primer como pseudo-segundo orden hasta el modelo de Elovich y la difusión intraparticular. Dentro de estos procesos se resalta la aplicación de conceptos fundamentales de la termodinámica como entalpía y entropía al igual que la función de energía libre de Gibbs buscando determinar si una reacción puede o no ser espontánea teniendo en cuenta el intercambio de calor y el desorden generado. El estudio teórico de los residuos frutales como medio de adsorción no solo impulsa el desarrollo de nuevo métodos de procesamiento y análisis de datos en el campo, sino que enriquece la teoría y reafirma la importancia de los análisis de caracterización como FTIR, SEM, TGA y XRD para entender la influencia que tiene la estructura y composición superficial en el comportamiento del adsorbente.

En la práctica, la implementación y/o aprovechamientos de los residuos frutales generados en el mundo como medio de adsorción de contaminantes fortalece el enfoque de sostenibilidad en el tratamiento de aguas residuales puesto que integra principios de la economía circular, la química verde y la valorización de los residuos, esto impulsa el desarrollo de métodos de tratamientos económicos, ecológicos y efectivos en lugares que tienen limitaciones en el acceso a tecnologías convencionales. Es así, que el aprovechamiento de estos residuos no solo permite reducir la carga o el impacto ambiental que se genera en la disposición final, sino que también contribuye a la disminución de costos en el tratamiento de

las aguas residuales ofreciendo la transferencia de tecnologías, la generación de soluciones a escala piloto e industrial, al igual que el fortalecimiento de políticas públicas ambientales con un enfoque al uso sostenible de recursos. Finalmente, la investigación en el campo no solo mejora la comprensión teórica, sino que permite identificar mejoras prácticas, así como identificar oportunidades de cooperación internacional y construcción de redes colaborativas interdisciplinarias donde se integre la química ambiental, la ingeniería de procesos, agricultura sostenible y la ciencia de materiales.

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS DIRECCIONES DE INVESTIGACIÓN

En este análisis se indagó la literatura científica de forma profunda y multidimensional que involucra la utilización de los residuos frutales como medio de adsorción de colorantes en el tratamiento de las aguas residuales en los últimos 12 años mediante el uso de herramientas gráficas para representar la evolución y las tendencias científicas de esta área en específico. Se determinó que la temática inicio fuertemente desde el año 2015, presentando una evolución significativa hasta la actualidad; con lo cual entendimos esta evolución del campo al revisar las colaboraciones internacionales, coincidencia de países, instituciones, autores, revistas y palabras claves. Gracias a esto, existe la posibilidad de considerar los obstáculos de la temática, así como cubrir las brechas en el campo del conocimiento. Por otro lado, se observó que países como China e India son los que más han intensificado las investigaciones en el campo, debido a que poseen una industria textil y de producción agrícola más desarrolladas, por lo lideran las redes de colaboración de centros de investigaciones y de autores.

Del análisis anterior, alcanzamos las siguientes conclusiones críticas: (1) los investigadores analizados buscan encontrar alternativas de bajo costo y de mínimo impacto ambiental para aplicar en los procesos de tratamientos de aguas residuales contaminadas con agentes colorantes, cerrando brechas entre las tecnologías tradicionales y los métodos experimentales actuales. Es así, que el desarrollo de nuevos compuestos, soluciones acuosas, bioadsorbentes o carbones activados derivados de residuos frutales ofrece la autonomía para analizar y controlar parámetros al igual que la eficiencia de los procesos de tratamiento relacionados con el uso práctico de estos, abriendo oportunidades al desarrollo de nuevos modelos o productos. (2) las investigaciones en el perfeccionamiento de las técnicas (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, la microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos X) han permitido tener una noción detallada sobre las características de los adsorbentes y su influencia en el proceso de adsorción de colorantes. (3) la implementación de modelos matemáticos (modelo de adsorción de Langmuir, pseudo-segundo orden y difusión intraparticular) para evaluar las variaciones en los parámetros termodinámicos y cinéticos que intervienen en los procesos permite no solo predecir el comportamiento superficial de las partículas en el proceso, sino que también comparar la cinética de adsorción entre diferentes materiales usados como coagulantes.

Las perspectivas futuras se pueden suponer en base a los resultados del análisis sobre la temática. Las posibles tendencias de investigación en los próximos años se enumeran a continuación: para el desarrollo del campo se plantea la evaluación de los adsorbentes de bajos costos basados en residuos frutales enfocados en la adsorción de los fenoles, micro contaminantes orgánicos (OMP) y/o contaminantes emergentes. Además, el mejoramiento de los modelos cinéticos que faciliten el entendimiento de los mecanismos de los procesos y el comportamiento de adsorción. Por otro lado, se predice el cambio de técnicas espectroscópicas por métodos que tengan lugar a reacciones tanto de oxidación como de reducción (Fotocatálisis). Es, por ende, que se deben adelantar y crear colaboraciones internacionales (autores, redes de investigación, centros académicos y universidades) que favorezcan y prioricen la utilización de los residuos frutales como medio de adsorción de agentes colorantes en el tratamiento de las aguas residuales generando bioadsorbentes efectivos y de bajos costos.

Asimismo, es fundamental desarrollar metodologías y/o técnicas que permitan analizar, detectar y eliminar los colorantes de las aguas de forma simple y efectiva, especialmente, en países en desarrollo donde los modelos económicos prevalecen por encima de las políticas ambientales. Del mismo modo, es importante prestar atención a las características tóxicas de estos agentes y sus efectos en el estado ecológico de los ecosistemas, así como en la salud pública; mediante la utilización de indicadores biológicos dado a la capacidad de respuesta a cambios en su hábitat. Finalmente, se deben incluir métodos de monitoreo integrales, técnicas de remediación innovadoras y políticas intersectoriales que permitan la conservación de los recursos naturales.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Este trabajo hizo parte del proyecto de investigación financiado por la Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica con el Acuerdo No. 149 - 29 de diciembre de 2023: "Evaluación de la eficiencia del mamón común (*Melicoccus Bijugatus*) como biocoagulante en el tratamiento de aguas residuales domésticas en el municipio de Aguachica, Cesar – Colombia".

6. REFERENCIAS

- [1] T. M. Budnyak *et al.*, "Methylene Blue dye sorption by hybrid materials from technical lignins," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 4997-5007, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.041>
- [2] S.-M. Lam, J.-C. Sin, A. Zuhairi Abdullah, and A. Rahman Mohamed, "Degradation of wastewaters containing organic dyes photocatalysed by zinc oxide: a review," *Desalin. Water Treat.*, vol. 41, no. 1-3, pp. 131-169, Mar. 2012. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.664698>
- [3] M. Shabir *et al.*, "A review on recent advances in the treatment of dye-polluted wastewater," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 112, pp. 1-19, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.05.013>
- [4] L. Dali Youcef, L. Setti Belaroui, and A. López-Galindo, "Adsorption of a cationic methylene blue dye on an Algerian palygorskite," *Appl. Clay Sci.*, vol. 179, p. 105145, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105145>
- [5] M. Tichonovas *et al.*, "Degradation of various textile dyes as wastewater pollutants under dielectric barrier discharge plasma treatment," *Chem. Eng. J.*, vol. 229, pp. 9-19, Aug. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.095>
- [6] O. Üner, Ü. Geçgel, and Y. Bayrak, "Adsorption of Methylene Blue by an Efficient Activated Carbon Prepared from *Citrullus lanatus* Rind: Kinetic, Isotherm, Thermodynamic, and Mechanism Analysis," *Water Air Soil Pollut.*, vol. 227, no. 247, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2949-1>
- [7] A. Prince Periyasamy, "Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment," *Sustain.*, vol. 16, no. 2, p. 495, Jan. 2024. <https://doi.org/10.3390/su16020495>
- [8] W. Lun Ang, and A. Wahab Mohammad, "State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment," *J. Clean. Prod.*, vol. 262, p. 121267, Jul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>
- [9] L. Hevira, Zilfa, Rahmayeni, J. O. Ighalo, H. Aziz, and R. Zein, "Terminalia catappa shell as low-cost biosorbent for the removal of methylene blue from aqueous solutions," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 97, pp. 188-199, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.01.028>
- [10] A. Stavrinou, C. A. Aggelopoulos, and C. D. Tsakiroglou, "Exploring the adsorption mechanisms of cationic and anionic dyes onto agricultural waste peels of banana, cucumber and potato: Adsorption kinetics and equilibrium isotherms as a tool," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 6, pp. 6958-6970, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.063>
- [11] S. M. de Oliveira Brito, J. L. Cunha Cordeiro, L. da Cunha Ramalho, and J. F. Ribeiro Oliveira, "Eriochrome black adsorption on yellow passion fruit peel (*Passiflora edulis* f. *Flavicarpa*) treated with sodium hydroxide and nitric acid: study of adsorption isotherms, kinetic models and thermodynamic parameters," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 1226, pp. 1-16, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1266-x>
- [12] A. K. Tolkou, E. K. Tsoutsas, I. A. Katsoyiannis, and G. Z. Kyzas, "Simultaneous removal of anionic and

- cationic dyes on quaternary mixtures by adsorption onto banana, orange and pomegranate peels,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 685, p. 133176, Mar. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133176>
- [13] F. Amalina, A. Syukor Abd Razak, S. Krishnan, A. W. Zularisam, and M. Nasrullah, “Dyes removal from textile wastewater by agricultural waste as an absorbent – A review,” *Clean. Waste Syst.*, vol. 3, p. 100051, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100051>
- [14] M. Kadhom, N. Albayati, H. Alalwan, and M. Al-Furaiji, “Removal of dyes by agricultural waste,” *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 16, p. 100259, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100259>
- [15] A. N. Md Ahsanul Haque, N. Sultana, A. S. Muhammad Sayem, and S. Akter Smriti, “Sustainable Adsorbents from Plant-Derived Agricultural Wastes for Anionic Dye Removal: A Review,” *Sustain.*, vol. 14, no. 17, p. 11098, Sep. 2022. <https://doi.org/10.3390/su141711098>
- [16] A. A. Al-Gheethi et al., “Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents: A review,” *Chemosphere*, vol. 287, no. Part 2, p. 132080, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132080>
- [17] M. Irfan, X. Liu, K. Hussain, S. Mushtaq, J. Cabrera, and P. Zhang, “The global research trend on cadmium in freshwater: a bibliometric review,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, pp. 71585-71598, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13894-7>
- [18] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. Marc Lim, “How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines,” *J. Bus. Res.*, vol. 133, pp. 285-296, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- [19] M. E. Falagas, E. I. Pitsouni, G. A. Malietzis, and G. Pappas, “Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses,” *The FASEB J.*, vol. 22, no. 2, pp. 338-342, Feb. 2008. <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492lsf>
- [20] Scopus, “SciVerse Scopus,” elsevier.com, 2020. Accessed: Dec. 06, 2020. [Online]. Available: <http://www.elsevier.com/online-tools/scopus>
- [21] E. M. Bartels, “How to perform a systematic search,” *Best Pract. Research: Clin. Rheum.*, vol. 27, no. 2, pp. 295-306, Apr. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2013.02.001>
- [22] N. J. Van Eck, and L. Waltman, “Bibliometric mapping of the computational intelligence field,” *Int. J. Uncert. Fuzziness Know Based Syst.*, vol.15, no. 5, pp. 625-645, Oct. 2007. <https://doi.org/10.1142/S0218488507004911>
- [23] N. J. Van Eck, L. Waltman, J. van den Berg, and U. Kaymak, “Visualizing the computational intelligence field,” *IEEE Comput. Intell. Mag.*, vol. 1, no. 4, pp. 6-10, Nov. 2006. <https://doi.org/10.1109/mci.2006.329702>
- [24] N. J. Van Eck and L. Waltman, “Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping,” *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523-538, Dec. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- [25] V. K. Gupta, P. J. M. Carrott, M. M. L. Ribeiro Carrott, and Suhas, “Low-Cost Adsorbents: Growing Approach to Wastewater Treatment—a Review,” *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 10, pp. 783-842, Oct. 2009. <https://doi.org/10.1080/10643380801977610>
- [26] M. G. Valladares-Cisneros, C. Valerio Cárdenas, P. de la Cruz Burelo, and R. M. Melgoza Alemán, “Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales,” *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 16, no. 31, pp. 55-73, Dec. 2017. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>
- [27] G. Crini, and E. Lichtfouse, “Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 145-155, Mar. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- [28] F. Laumann, J. von Kügelgen, and M. Barahona, “Non-linear interlinkages and key objectives amongst the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals,” in *ICLR 2020 Workshop: Tackling Climate Change with Machine Learning*, London, Berlin: Climate Change AI, 2020. <https://www.climatechange.ai/papers/iclr2020/9>
- [29] R. Singh et al., “Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: a review,” *Environ. Sustain.*, vol. 4, no. 4, pp. 619-636, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00200-x>
- [30] A. G. Capodaglio, A. Callegari, D. Ceconet, and D. Molognoni, “Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies,” *Water Pract. Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 463-477, Jun. 2017. <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.055>
- [31] Y. Liu, and H. Zhao, “Quantitative Evaluation of Policy Based on PMC Index Model: A Case Study of China’s Textile Industry Policy,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2022, no. 1, pp. 1-17, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1870185>
- [32] M. Tajul Islam, M. A. Al Mamun, A. F. M. Fahad Halim, R. Peila, and D. O. Sánchez Ramírez, “Current

- trends in textile wastewater treatment—bibliometric review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 13, pp. 19166-19184, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32454-3>
- [33] H. Abdulla et al., "An overview of agro-food industry wastewater treatment: a bibliometric analysis and literature review," *Appl. Water Sci.*, vol. 13, no. 2, p. 47, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01857-3>
- [34] M. K. Verma, O. C. Sharma, J. I. Mir, W. H. Raja, and S. U. Nabi, "Current Status and Potential of Temperate Fruit Crops for Livelihood and Nutritional Security in India," *Indian J. Plant Genet. Resour.*, vol. 37, no. 3, pp. 387-403, Aug. 2024. <https://ispqr.in/index.php/ijpqr/article/view/2694/2403>
- [35] H. Yang et al., "A comprehensive overview of geopolymer composites: A bibliometric analysis and literature review," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e00830, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00830>
- [36] N. R. Zuanazzi, N. de Castillos Ghisi, and E. Celton Oliveira, "Analysis of global trends and gaps for studies about 2,4-D herbicide toxicity: A scientometric review," *Chemosphere*, vol. 241, p. 125016, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125016>
- [37] SCImago, "SJR — Scimago Journal & Country Rank," scimagojr.com, 2023. Accessed: Dec. 06, 2020. [Online]. Available: <http://www.scimagojr.com>
- [38] A. Saeed, M. Sharif, and M. Iqbal, "Application potential of grapefruit peel as dye sorbent: Kinetics, equilibrium and mechanism of crystal violet adsorption," *J. Hazard. Mater.*, vol. 179, no. 1-3, pp. 564-572, Jul. 2010. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438941000347X>
- [39] P. Sharma, H. Kaur, M. Sharma, and V. Sahore, "A review on applicability of naturally available adsorbents for the removal of hazardous dyes from aqueous waste," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 183, no. 1-4, pp. 151-195, Dec. 2011. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1914-0>
- [40] G. Kyzas, and M. Kostoglou, "Green Adsorbents for Wastewaters: A Critical Review," *Materials*, vol. 7, no. 1, pp. 333-364, Jan. 2014. <https://doi.org/10.3390/ma7010333>
- [41] T. Ahmad, and M. Danish, "Prospects of banana waste utilization in wastewater treatment: A review," *J. Environ. Manage.*, vol. 206, pp. 330-348, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.061>
- [42] J. Wu, J. Yang, P. Feng, G. Huang, C. Xu, and B. Lin, "High-efficiency removal of dyes from wastewater by fully recycling litchi peel biochar," *Chemosphere*, vol. 246, p. 125734, May. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125734>
- [43] N. Hussain Solangi, J. Kumar, S. Ali Mazari, S. Ahmed, N. Fatima, and N. Mujawar Mubarak, "Development of fruit waste derived bio-adsorbents for wastewater treatment: A review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 416, p. 125848, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125848>
- [44] C. Bhattacharjee, S. Dutta, and V. K. Saxena, "A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent," *Environ. Adv.*, vol. 2, p. 100007, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100007>
- [45] E. Misran, O. Bani, E. M. Situmeang, and A. Suciani Purba, "Banana stem based activated carbon as a low-cost adsorbent for methylene blue removal: Isotherm, kinetics, and reusability," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 3, pp. 1946-1955, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.07.022>
- [46] S. Marković, A. Stanković, Z. Lopičić, S. Lazarević, M. Stojanović, and D. Uskoković, "Application of raw peach shell particles for removal of methylene blue," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 716-724, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.04.002>
- [47] Z. Zhan Loh et al., "Shifting from Conventional to Organic Filter Media in Wastewater Biofiltration Treatment: A Review," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 18, p. 8650, Sep. 2021. <https://doi.org/10.3390/app11188650>
- [48] A. Bhatnagar, M. Sillanpää, and A. Witek-Krowiak, "Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification – A review," *Chem. Eng. J.*, vol. 270, pp. 244-271, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.135>
- [49] C. E. Almeida-Naranjo et al., "From Renewable Biomass to Water Purification Systems: Oil Palm Empty Fruit Bunch as Bio-Adsorbent for Domestic Wastewater Remediation and Methylene Blue Removal," *Water*, vol. 15, no. 23, p. 4116, Nov. 2023. <https://doi.org/10.3390/w15234116>
- [50] S. Mishra, L. Cheng, and A. Maiti, "The utilization of agro-biomass/byproducts for effective bio-removal of dyes from dyeing wastewater: A comprehensive review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 1, p. 104901, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104901>
- [51] Prateek, P. Kumar, R. Kumar Gupta, V. Chandra Srivastava, I. Deo Mall, and U. Lavrenčič Štangar, "Agricultural waste for the production of biobased products for remediation of hydroquinone from wastewater," *J. Indian Chem. Soc.*, vol. 101, no. 3, p. 101131, Mar. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101131>
- [52] R. Rehman et al., "Isothermal and kinetic investigation of sorption efficacy of titania and bentonite nanocomposite for brilliant green dye removal for wastewater treatment," *J. Dispers. Sci. Technol.*,

- vol. 46, no. 10, pp. 1-11, Apr. 2024. <https://doi.org/10.1080/01932691.2024.2334006>
- [53] G. V. Serban et al., "Removal Efficiency and Adsorption Kinetics of Methyl Orange from Wastewater by Commercial Activated Carbon," *Sustain.*, vol. 15, no. 17, p. 12939, Aug. 2023. <https://doi.org/10.3390/su151712939>
- [54] B. Khabiri, M. Ferdowsi, G. Buelna, J. P. Jones, and M. Heitz, "Bioelimination of low methane concentrations emitted from wastewater treatment plants: a review," *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 42, no. 3, pp. 450-467, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1940830>
- [55] S. Reddy, and J. W. Osborne, "Biodegradation and biosorption of Reactive Red 120 dye by immobilized *Pseudomonas guariconensis*: Kinetic and toxicity study," *Water Environ. Res.*, vol. 92, no. 8, pp. 1230-1241, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1002/wer.1319>
- [56] U. A. Edet, and A. O. Ifelebuegu, "Kinetics, Isotherms, and Thermodynamic Modeling of the Adsorption of Phosphates from Model Wastewater Using Recycled Brick Waste," *Processes*, vol. 8, no. 6, p. 665, Jun. 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8060665>
- [57] M. Benjelloun, Y. Miyah, G. Akdemir Evrendilek, F. Zerrouq, and S. Lairini, "Recent Advances in Adsorption Kinetic Models: Their Application to Dye Types," *Arab. J. Chem.*, vol. 14, no. 4, p. 103031, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103031>
- [58] R. Saldaña Escorcía, and J. K. Castillo Gámez, "Alternativas para la estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales desde un enfoque sistémico: una revisión," *Rev. Investig. Agrar. y Ambient.*, vol. 13, no. 1, pp. 175-194, Dec. 2021. <https://doi.org/10.22490/21456453.4504>
- [59] P. Andreo-Martínez, V. M. Ortiz-Martínez, N. García-Martínez, A. Pérez de los Ríos, F. J. Hernández-Fernández, and J. Quesada-Medina, "Production of biodiesel under supercritical conditions: State of the art and bibliometric analysis," *Appl. Energy*, vol. 264, p. 114753, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114753>
- [60] F. López-Muñoz et al., "A bibliometric analysis of scientific production on atypical antipsychotic drugs from Italy.," *Riv. Psichiatr.*, vol. 52, no. 6, pp. 236-246, Nov-Dec. 2017. <https://doi.org/10.1708/2846.28727>
- [61] D. H. Da Silva Santos et al., "Regeneration of dye-saturated activated carbon through advanced oxidative processes: A review," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, p. e10205, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10205>
- [62] B. M. Thamer, F. A. Al-aizari, and H. S. Abdo, "Enhanced Adsorption of Textile Dyes by a Novel Sulfonated Activated Carbon Derived from Pomegranate Peel Waste: Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Study," *Molecules*, vol. 28, no. 23, p. 7712, Nov. 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28237712>
- [63] E. Rápó, and S. Tonk, "Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption; Desorption Studies: A Review of Results from the Last Five Years (2017–2021)," *Molecules*, vol. 26, no. 17, p. 5419, Sep. 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26175419>
- [64] Momina, S. Mohammad, and I. Suzylawati, "Study of the adsorption/desorption of MB dye solution using bentonite adsorbent coating," *J. Water Process Eng.*, vol. 34, p. 101155, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101155>
- [65] İ. Şentürk, and M. Alzein, "Adsorption of Acid Violet 17 onto Acid-Activated Pistachio Shell: Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Studies," *Acta Chim. Slov.*, vol. 67, no. 1, pp. 55-69, Mar. 2020. <https://doi.org/10.17344/acsi.2019.5195>
- [66] E. Freitas Diogo Januário, T. Basso Vidovix, L. Alonso de Araújo, L. Bergamasco Beltran, R. Bergamasco, and A. Marquetotti Salcedo Vieira, "Investigation of Citrus reticulata peels as an efficient and low-cost adsorbent for the removal of safranin orange dye," *Environ. Technol.*, vol. 43, no. 27, pp. 4315-4329, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1946601>
- [67] A. B. Abdel-Aziz et al., "Bio-inspired adsorption sheets from waste material for anionic methyl orange dye removal," *SN Appl. Sci.*, vol. 5, no. 12, p. 371, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05600-8>
- [68] J. Gubitosa, V. Rizzi, P. Fini, S. Nuzzo, and P. Cosma, "Regenerable Kiwi Peels as an Adsorbent to Remove and Reuse the Emerging Pollutant Propranolol from Water," *Processes*, vol. 10, no. 7, p. 1417, Jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10071417>
- [69] H. Patel, "Review on solvent desorption study from exhausted adsorbent," *J. Saudi Chem. Soc.*, vol. 25, no. 8, p. 101302, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101302>
- [70] G. Z. Kyzas, J. Fu, and K. A. Matis, "The Change from Past to Future for Adsorbent Materials in Treatment of Dyeing Wastewaters.," *Materials*, vol. 6, no. 11, pp. 5131-5158, Nov. 2013. <https://doi.org/10.3390/ma6115131>
- [71] A. Srinivasan, and T. Viraraghavan, "Decolorization of dye wastewaters by biosorbents: A review," *J.*

- Environ. Manage.*, vol. 91, no. 10, pp. 1915-1929, Oct. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.003>
- [72] M. Ahmaruzzaman, and R. Amin Reza, "Decontamination of cationic and anionic dyes in single and binary mode from aqueous phase by mesoporous pulp waste," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 724-735, May. 2015. <https://doi.org/10.1002/ep.12055>
- [73] L. Ifa, T. Syarif, S. Sartia, J. Juliani, N. Nurdjannah, and H. S. Kusuma, "Techno-economics of coconut coir bioadsorbent utilization on free fatty acid level reduction in crude palm oil," *Heliyon*, vol. 8, no. 3, p. e09146, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09146>
- [74] Y. Gopalakrishnan et al., "Removal of Basic Brown 16 from Aqueous Solution Using Durian Shell Adsorbent, Optimisation and Techno-Economic Analysis," *Sustain.*, vol. 12, no. 21, p. 8928, Oct. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12218928>
- [75] T. Assefa Aragaw, and F. Masengaw Bogale, "Biomass-Based Adsorbents for Removal of Dyes From Wastewater: A Review," *Front. Environ. Sci.*, vol. 9, Dec. 2021. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.764958>
- [76] S. Praveen, R. Gokulan, T. Bhagavathi Pushpa, and J. Jegan, "Techno-economic feasibility of biochar as biosorbent for basic dye sequestration," *J. Indian Chem. Soc.*, vol. 98, no. 8, p. 100107, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100107>
- [77] D. L. Gómez-Aguilar, J. P. Rodríguez-Miranda, and O. J. Salcedo-Parra, "Fruit Peels as a Sustainable Waste for the Biosorption of Heavy Metals in Wastewater: A Review," *Molecules*, vol. 27, no. 7, Mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27072124>
- [78] Y. Jari, N. Roche, M. Chaker Necibi, S. El Hajjaji, D. Dhiba, and A. Chehbouni, "Emerging Pollutants in Moroccan Wastewater: Occurrence, Impact, and Removal Technologies," *J. Chem.*, vol. 2022, p. 727857, pp. 1-24, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9727857>
- [79] I. Haddaoui, and J. Mateo-Sagasta, "A review on occurrence of emerging pollutants in waters of the MENA region," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 48, pp. 68090-68110, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16558-8>
- [80] M. Zbair et al., "Toward new benchmark adsorbents: preparation and characterization of activated carbon from argan nut shell for bisphenol A removal," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 1869-1882, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0634-6>
- [81] A. B. Hernández-Abreu et al., "Enhanced removal of the endocrine disruptor compound Bisphenol A by adsorption onto green-carbon materials. Effect of real effluents on the adsorption process," *J. Environ. Manage.*, vol. 266, p. 110604, Jul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110604>
- [82] M. Belhachemi, and S. Djelaila, "Removal of Amoxicillin Antibiotic from Aqueous Solutions by Date Pits Activated Carbons," *Environ. Process.*, vol. 4, no. 3, pp. 549-561, Sep. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0245-8>
- [83] W. Wang, R. Kang, Y. Yin, S. Tu, and L. Ye, "Two-step pyrolysis biochar derived from agro-waste for antibiotics removal: Mechanisms and stability," *Chemosphere*, vol. 292, p. 133454, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133454>
- [84] A. Ashiq, N. M. Adassooriya, B. Sarkar, A. U. Rajapaksha, Y. S. Ok, and M. Vithanage, "Municipal solid waste biochar-bentonite composite for the removal of antibiotic ciprofloxacin from aqueous media," *J. Environ. Manage.*, vol. 236, pp. 428-435, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.006>
- [85] H. M. Hamadeen, and E. A. Elkhatib, "New nanostructured activated biochar for effective removal of antibiotic ciprofloxacin from wastewater: Adsorption dynamics and mechanisms," *Environ. Res.*, vol. 210, p. 112929, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112929>
- [86] X. Fan, Z. Qian, J. Liu, N. Geng, J. Hou, and D. Li, "Investigation on the adsorption of antibiotics from water by metal loaded sewage sludge biochar," *Water Sci. Technol.*, vol. 83, no. 3, pp. 739-750, Feb. 2021. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.578>
- [87] J. Jegan, S. Praveen, T. B. Pushpa, and R. Gokulan, "Biodecolorization of Basic Violet 03 Using Biochar Derived from Agricultural Wastes: Isotherm and Kinetics," *J. Biobased Mater. Bioenergy*, vol. 14, no. 3, pp. 316-326, Jun. 2020. https://www.researchgate.net/publication/342349147_Biodecolorization_of_Basic_Violet_03_Using_Biochar_Derived_from_Agricultural_Wastes_Isotherm_and_Kinetics
- [88] J. Jegan, S. Praveen, T. Bhagavathi Pushpa, and R. Gokulan, "Sorption kinetics and isotherm studies of cationic dyes using groundnut (*arachis hypogaea*) shell derived biochar a low-cost adsorbent," *Appl. Ecol. Environ. Res.*, vol. 18, no. 1, pp. 1925-1939, Apr. 2020. https://doi.org/10.15666/aeer/1801_19251939
- [89] S. Prabha Viswanthan et al., "Removal efficiency of methylene blue from aqueous medium using biochar derived from Phragmites karka, a highly invasive wetland weed," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 12, no. 8, pp. 3257-3273, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00877-w>

- [90] M. Dong *et al.*, "Biochar for the Removal of Emerging Pollutants from Aquatic Systems: A Review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 3, p. 1679, Jan. 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031679>
- [91] N. Cheng *et al.*, "Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review," *Environ. Pollut.*, vol. 273, p. 116448, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116448>
- [92] Z. Ahmad Ganie, N. Khandelwal, E. Tiwari, N. Singh, and G. Krishna Darbha, "Biochar-facilitated remediation of nanoplastic contaminated water: Effect of pyrolysis temperature induced surface modifications," *J. Hazard. Mater.*, vol. 417, p. 126096, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126096>
- [93] J. Wang, C. Sun, Q.-X. Huang, Y. Chi, and J.-H. Yan, "Adsorption and thermal degradation of microplastics from aqueous solutions by mg/Zn modified magnetic biochars," *J. Hazard. Mater.*, vol. 419, p. 126486, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126486>
- [94] R. Kumar *et al.*, "Adsorptive behavior of micro(nano)plastics through biochar: Co-existence, consequences, and challenges in contaminated ecosystems," *Sci. Total Environ.*, vol. 856, no. Part 1, p. 159097, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159097>
- [95] P. Mulindwa, J. S. Kasule, F. Nantaba, J. Wasswa, and A. J. Expósito, "Bioadsorbents for removal of microplastics from water ecosystems: a review," *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 582-599, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2374003>

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron sustancialmente a la concepción y el diseño del estudio, a la redacción del artículo y a la revisión crítica del manuscrito en busca de contenido intelectual importante.

Rosember Saldaña-Escorcía: Conceptualización, Metodología, Investigación, Visualización, Curación de datos, Análisis formal, Redacción: borrador original, y Redacción: revisión y edición

Danilo Alfonso Piña-Velásquez: Conceptualización, Análisis formal, Redacción: borrador original, Redacción: revisión y edición.