

Materiales Adsorbentes Basados en Aluminosilicatos para la Remoción de Tinturas y Pigmentos
en Aguas Residuales de la Industria Textil: Una revisión sistemática

Cristhian Alberto Duran Rizo

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico Modalidad Investigación.

Directora

Diana Paola Duarte Duarte

Doctora en Ingeniería Química

Codirector

Fernando Viejo Abrante

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Doraine Rizo Galviz y a Néstor Durán Afanador, mis padres, por su amor incondicional, su paciencia infinita y su respaldo constante. Gracias por ser mi mayor ejemplo de fortaleza, por impulsarme a no rendirme y por acompañarme en cada paso de este camino. Todo logro nace de ustedes.

A Camilo Caballero, mi hermano, por su compañía, confianza y apoyo sincero. Gracias por estar presente en cada etapa de este proceso, por compartir conmigo alegrías y desafíos, y por recordarme siempre el valor de la perseverancia y que un amigo se puede convertir en familia.

A todos ustedes, que han sido parte fundamental de mi vida y de este logro, les dedico con gratitud y cariño el fruto de este esfuerzo.

Agradecimientos

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres, a mi tío y a mi hermanita por su amor incondicional, por formarme con valores de esfuerzo, disciplina y perseverancia, y por acompañarme con paciencia y fortaleza en cada etapa de mi vida. Gracias por ser mi apoyo constante, mi fuente diaria de motivación y alegría, y por recordarme siempre, con orgullo y cariño, que todo sacrificio encuentra su recompensa.

A Camilo Caballero, mi hermano, por su amistad, apoyo y presencia constante. Gracias por las palabras de aliento, por compartir conmigo los desafíos y satisfacciones de este camino, y por demostrarme el valor de contar siempre con la familia.

A Diana Paola Duarte Duarte y Fernando Viejo Abrante, por su valiosa orientación en la dirección de esta tesis, sus oportunas correcciones y sus enseñanzas, tanto académicas como personales, que enriquecieron mi formación profesional y humana.

A mi mascota, fiel compañero de muchos años, cuya lealtad, ternura y energía me brindaron serenidad y compañía en los momentos de mayor exigencia.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de este importante logro. Este trabajo no solo representa un esfuerzo personal, sino también el apoyo, la confianza y el cariño de quienes me acompañaron durante este camino.

Tabla de contenido

1. Introducción	9
2. Objetivos	11
3. Estado del Arte	12
4. Metodología	17
5. Resultados y discusión	20
5.1. Selección de la información: resultados del protocolo PRISMA	20
5.2. Análisis bibliométrico	22
5.3. Evaluación de los materiales adsorbentes	25
a. Clasificación y desempeño de materiales sin modificar	26
b. Modificaciones, funcionalizaciones y dopajes	28
c. Capacidad de adsorción (q_{\max})	29
d. Mecanismos y cinética de adsorción	34
5.4. Influencia de las variables operativas	35
5.5. Brechas y retos	40
6. Conclusiones	42
Referencias bibliográficas	44

Listado de Tablas

Tabla 1. Criterios para la selección de los artículos de la revisión sistemática	19
Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda planteadas para cada base de datos y resultados obtenidos.	20
Tabla 3. Efecto de la modificación magnética en variables operativas.....	29
Tabla 4. Comparativa de Capacidades y Desempeño Mecánico de Adsorbentes.....	31
Tabla 5. Parámetros operacionales y de adsorción de zeolitas a partir de estudios reportados en la literatura	37
Tabla 6. Comparación de parámetros de adsorción en zeolitas reportadas en la literatura.arámetros	37

Listado de Figuras

Figura 1. Algoritmo metodológico planteado para la revisión sistemática.....	20
Figura 2. Resumen del proceso de búsqueda y selección de la información de acuerdo con el protocolo PRISMA.....	22
Figura 3. Distribución de artículos por año	23
Figura 4. VOSviewer palabras claves de los artículos seleccionados para la investigación.	23
Figura 5. Clasificación de numero de artículos por tipo de material adsorbente	25
Figura 6. Mecanismo de silanización	36

Resumen

Título: Revisión Sistemática de Materiales Adsorbentes Basados en Aluminosilicatos para la Remoción de Tinturas y Pigmentos en Aguas Residuales de la Industria Textil¹

Autor: Cristhian Alberto Duran Rizo²

Palabras clave: Aguas residuales textiles, tinturas, pigmentos, aluminosilicatos, zeolitas, adsorción.

Descripción: La industria textil es una de las principales fuentes de contaminación hídrica debido a la descarga de efluentes con alta carga de colorantes y pigmentos, los cuales presentan baja biodegradabilidad y alta persistencia en el medio ambiente. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un estudio de vigilancia científico-tecnológica sobre el uso de aluminosilicatos como materiales adsorbentes para la remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales textiles, mediante una revisión sistemática de la literatura.

Se analizaron 68 artículos científicos, permitiendo realizar un estudio bibliométrico que evidenció un crecimiento sostenido en la producción científica, liderado principalmente por países asiáticos. Los resultados muestran que los aluminosilicatos, especialmente las zeolitas sintéticas y modificadas, presentan altas capacidades de adsorción, alcanzando valores superiores a 1000 mg/g en materiales funcionalizados, mientras que las zeolitas derivadas de residuos industriales presentan capacidades competitivas cercanas a 200 mg/g, destacándose por su bajo costo y sostenibilidad.

El análisis de las variables operativas permitió identificar que el pH es el factor más influyente en el proceso de adsorción, afectando directamente la carga superficial del adsorbente y la eficiencia de remoción. Asimismo, se evidenció que la cinética de adsorción sigue predominantemente un modelo de pseudo-segundo orden, con tiempos de equilibrio entre 40 y 120 minutos, lo que favorece su aplicación en sistemas de tratamiento.

Finalmente, se identificaron desafíos importantes para su implementación industrial, tales como la falta de estudios en sistemas continuos, la influencia de iones competidores y los costos asociados al ajuste de pH. En conclusión, las zeolitas sintéticas obtenidas a partir de residuos industriales se posicionan como la alternativa más viable para su aplicación en el contexto colombiano, al ofrecer un equilibrio entre eficiencia, costo y sostenibilidad.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Diana Paola Duarte Duarte, doctora en Ingeniería Química. Codirector: Fernando Viejo Abrante, doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Abstract

Title: Systematic Review of Aluminosilicate-Based Adsorbent Materials for the Removal of Dyes and Pigments from Textile Industry Wastewater³

Author: Cristhian Alberto Durán Rizo⁴

Keywords: Textile wastewater, dyes, pigments, aluminosilicates, zeolites, adsorption.

Description: The textile industry is one of the main sources of water pollution due to the discharge of effluents containing high concentrations of dyes and pigments, which are characterized by low biodegradability and high environmental persistence. In this context, the aim of this study was to develop a scientific and technological surveillance analysis on the use of aluminosilicates as adsorbent materials for the removal of dyes and pigments from textile wastewater, through a systematic literature review.

A total of 68 scientific articles were analyzed, enabling a bibliometric study that revealed a steady growth in scientific production, mainly led by Asian countries. The results show that aluminosilicates, particularly synthetic and modified zeolites, exhibit high adsorption capacities, reaching values above 1000 mg/g in functionalized materials, while zeolites derived from industrial residues show competitive capacities around 200 mg/g, standing out for their low cost and sustainability.

The analysis of operational variables identified pH as the most influential factor in the adsorption process, directly affecting the surface charge of the adsorbent and the removal efficiency. Additionally, adsorption kinetics predominantly follow a pseudo-second-order model, with equilibrium times ranging from 40 to 120 minutes, which favors their application in treatment systems.

Finally, important challenges for industrial implementation were identified, including the lack of studies in continuous systems, the influence of competing ions, and the costs associated with pH adjustment. In conclusion, synthetic zeolites obtained from industrial residues emerge as the most viable alternative for application in the Colombian context, offering a balance between efficiency, cost, and sustainability.

³ Degree work.

⁴ Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Diana Paola Duarte Duarte, Chemical Engineering Ph.D. Codirector: Fernando Viejo Abrante, Science and Technology of Materials Ph.D.

1. Introducción

La generación de aguas residuales con altas cargas de tinturas y pigmentos constituye una de las problemáticas más persistentes asociadas a la industria textil. Estos compuestos, en su mayoría de origen sintético, poseen estructuras químicas complejas diseñadas para resistir la degradación química, térmica y biológica, lo que dificulta su eliminación mediante tratamientos convencionales (Chung et al, 2016). La presencia de colorantes en medios acuáticos, incluso en concentraciones bajas de 7.10^{-6} mol/l, modifica las propiedades ópticas y fisicoquímicas del agua, afectando la fotosíntesis de organismos acuáticos y reduciendo la disponibilidad de oxígeno disuelto (Forgacs et al, 2004).

Dentro de este grupo, los tintes azoicos destacan por su amplia utilización en procesos de teñido de fibras naturales y sintéticas debido a su bajo costo, versatilidad y estabilidad frente a condiciones adversas. No obstante, un tinte azoico se caracteriza por contener uno o más grupos azo ($R - N = N - R$) que sirven de unión entre dos anillos aromáticos (Slokar et al, 1998). Este fenómeno bloquea la penetración de la radiación solar, afectando directamente los procesos de fotosíntesis y reduciendo la disponibilidad de oxígeno disuelto para los organismos acuáticos. (Holkar et al, 2016). Estas características, que resultan deseables en términos de durabilidad del color, son las mismas que dificultan su tratamiento y eliminación efectiva.

Si bien los métodos convencionales, como la coagulación-floculación y la oxidación química, han sido ampliamente implementados en la industria para el tratamiento de aguas residuales, presentan desventajas críticas que comprometen su sostenibilidad. (Wang et al., 2010). La coagulación, por ejemplo, aunque efectiva en la remoción de color, conlleva la generación masiva de lodos químicos cuyo manejo y disposición final representan un costo operativo elevado y un riesgo de contaminación secundaria. Por otro lado, los procesos de oxidación, si bien logran

la decoloración, a menudo requieren reactivos costosos y condiciones energéticas intensas, con el riesgo latente de realizar una degradación incompleta que dé lugar a subproductos más tóxicos que el contaminante original.

En este contexto, la adsorción se posiciona como una alternativa eficiente para la remoción de colorantes, gracias a su capacidad para retener moléculas complejas sin generar subproductos peligrosos. Este proceso se caracteriza por su simplicidad operativa, flexibilidad y posibilidad de regenerar o reutilizar el material adsorbente. Entre los materiales adsorbentes estudiados, los aluminosilicatos, y especialmente las zeolitas, han demostrado un desempeño sobresaliente debido a su estructura porosa tridimensional, elevada superficie específica y alta capacidad de intercambio iónico (Jiang et al, 2019). Estas características permiten la captura eficiente de moléculas de gran tamaño y carga, como las presentes en los colorantes textiles.

El interés por los aluminosilicatos radica no solo en su eficacia técnica, sino también en su potencial de disponibilidad y bajo costo. Las zeolitas naturales pueden obtenerse de depósitos minerales y, en muchos casos, requerir un procesamiento mínimo antes de su uso, mientras que las zeolitas sintéticas ofrecen la ventaja de una estructura controlada y propiedades adaptadas a contaminantes específicos. Además, la posibilidad de modificar su superficie mediante tratamientos químicos o térmicos amplía su rango de aplicaciones y mejora su selectividad frente a determinados compuestos (Slokar et al, 1998).

En este marco, la revisión sistemática de la literatura científica reciente sobre el uso de aluminosilicatos para la remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales textiles constituye un paso necesario para consolidar el conocimiento existente y orientar futuras investigaciones. Este trabajo permitirá identificar las tendencias y avances más relevantes, fomentando el desarrollo de soluciones más sostenibles y eficientes en el tratamiento de efluentes industriales.

2. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un estudio de vigilancia científico sobre el uso de aluminosilicatos como materiales adsorbentes destinados a la remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales de la industria textil, en el marco de una revisión sistemática.

Objetivos Específicos

- Realizar un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas relacionadas con la remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales de la industria textil, enfocándose en el uso de aluminosilicatos como materiales adsorbentes.
- Identificar los avances científicos y tecnológicos en el desarrollo de aluminosilicatos para la remoción de tinturas y pigmentos, destacando su aplicabilidad en el contexto colombiano.
- Identificar los desafíos y brechas en el uso de aluminosilicatos para la remoción de tinturas y pigmentos para mejorar su aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales textiles en Colombia.

3. Estado del Arte

La problemática global asociada a la descarga de efluentes textiles cargados de colorantes sintéticos recalcitrantes ha impulsado una vigorosa actividad científica en la última década. El análisis de la literatura científica de los últimos cinco años permite identificar tres macro-tendencias que delinear la frontera del conocimiento en este campo: la funcionalización química de aluminosilicatos, la síntesis de materiales híbridos y la valorización de residuos industriales bajo principios de economía circular. En este sentido, resulta clave comprender la naturaleza química de los colorantes textiles, así como las propiedades que determinan su comportamiento en los efluentes y la eficacia de los métodos de tratamiento. Estos aspectos se abordan a continuación.

Clasificación y naturaleza química de los colorantes textiles

Los colorantes sintéticos son compuestos orgánicos complejos diseñados para resistir la degradación por luz, agua y agentes químicos. Su clasificación principal se basa en su comportamiento iónico en solución acuosa y su método de aplicación:

- **Colorantes Aniónicos:** Incluyen colorantes ácidos, directos y reactivos. Poseen una carga neta negativa debido a grupos funcionales como los sulfonatos ($R-SO_3$). Son ampliamente utilizados en fibras celulósicas (algodón) y proteicas (lana) (Stiborová et al., 2002; Pereira et al., 2019).
- **Colorantes Catiónicos:** Conocidos como colorantes básicos, poseen una carga positiva (ej. azul de metileno). Son altamente visibles incluso a bajas concentraciones y se emplean principalmente en fibras acrílicas y procesos de acabado Alsharief et al. (2023).

- Colorantes No Iónicos: Como los colorantes dispersos, carecen de carga y presentan baja solubilidad en agua, utilizándose principalmente en fibras sintéticas como el poliéster (Stiborová et al., 2002.)
- Colorantes Azoicos: Caracterizados por el grupo funcional azo ($R-N=N-R$), constituyen más del 60-70% de la producción mundial debido a su bajo costo y amplia gama cromática, pero son los más problemáticos desde el punto de vista toxicológico (Zari et al., 2024).
- Zeolitas Naturales: Estas se obtienen de depósitos minerales y, por lo general, requieren un procesamiento mínimo. Su fuerte es el intercambio iónico; es decir, los iones presentes en los colorantes son reemplazados por los que forman parte de la estructura del material. La clinoptilolita es una de las más estudiadas debido a su alto contenido de sílice y a su capacidad para favorecer la formación de compuestos magnéticos (Altintig et al., 2022). Otros tipos, como la mordenita o la phillipsita, también resultan de interés porque son baratas y tienen microporos Ay & Sarpaşar, 2023. No obstante, la clinoptilolita suele ser la más utilizada debido a sus destacadas propiedades de adsorción.
- Zeolitas Sintetizadas: Su principal ventaja radica en la posibilidad de controlar tanto su estructura como las propiedades de su superficie. Pueden producirse a partir de reactivos químicos puros o, de manera más sostenible, a partir de residuos industriales como las cenizas volantes, lo que permite obtener materiales con poros altamente ordenados. Aquí la clave es la "funcionalización" de la superficie, que hace que la capacidad de adsorción suba exponencialmente. Un caso claro es la síntesis usando metacaolín para remover azul de metileno (Altintig et al., 2022). Asimismo, se destaca la zeolita LTA (que es un aluminosilicato sintético de poro pequeño), que puede obtenerse a partir de residuos de

aluminio. En general, las zeolitas sintéticas son más estables, se pueden reusar más veces y adsorben mejor que las que vienen de la naturaleza (Ay & Sarpaşar, 2023)

- **Sistemas Catiónicos ($pH > pH_{pzc}$):** En adsorbentes como las arcillas naturales y zeolitas, el rendimiento es óptimo en rangos de pH neutro a básico (7.0 - 10.0). En estas condiciones, la superficie adquiere una densidad de carga negativa que potencia el intercambio iónico
- **Sistemas Aniónicos ($pH < pH_{pzc}$):** La remoción es máxima en pH ácidos (2.0 - 4.0). El exceso de protones (H^+) en la solución satura la superficie del material, cargándolo positivamente y permitiendo una atracción electrostática con los grupos funcionales del colorante
- Además del pH, la eficiencia se ve afectada por la temperatura (incidiendo en la entalpía del sistema), la dosificación del adsorbente (g/L) y el tiempo de contacto, que suele alcanzar el equilibrio entre los 60 y 120 minutos en la mayoría de los ensayos cinéticos reportados.

Aplicaciones industriales y generación de efluentes

Los colorantes sintéticos son ampliamente utilizados en diversos sectores industriales, siendo la industria textil el principal consumidor y, en consecuencia, la mayor fuente de efluentes contaminados. Sin embargo, su aplicación en otras industrias también contribuye de manera significativa a la descarga de estos compuestos en cuerpos de agua, configurando un problema ambiental de carácter multisectorial. La exposición a colorantes sintéticos, especialmente los del tipo azo, representa un riesgo severo para la salud pública:

- **Industria Textil:** Genera grandes volúmenes de efluentes con alta variabilidad de pH y carga orgánica. Los colorantes reactivos son especialmente problemáticos debido a que una fracción significativa (hasta el 50%) no se fija a la fibra y termina en el efluente (Altintig et al., 2022).
- **Cuero y Papel:** Utilizan predominantemente colorantes aniónicos y básicos para teñido y pigmentación, aportando descargas con altas concentraciones de sales y metales pesados asociados (Zari et al., 2024)
- **Otras industrias:** La producción de cosméticos, alimentos y plásticos también contribuye a la carga de colorantes sintéticos en cuerpos de agua, aunque en menor volumen que el sector textil (Wang & Peng, 2010).
- **Impacto toxicológico y riesgos para la salud:** La exposición a colorantes, especialmente los de tipo azo, representa un severo riesgo para la salud pública debido a su potencial genotóxico y carcinogénico. Un ejemplo crítico es el 1-fenilazo-2-hidroxi-naftol (Sudán I), el cual ha sido identificado como un potente carcinógeno hepático y de vejiga en mamíferos. Según Stiborová y colaboradores, la peligrosidad radica en su activación metabólica mediada por las enzimas del citocromo P450 (Wang & Peng, 2010), específicamente la isoenzima CYP1A1. Estos autores demostraron que la CYP1A1 cataliza la formación de metabolitos reactivos que generan aductos con el ADN, un paso bioquímico fundamental en el desarrollo de tumores. Por otro lado, compuestos de alta persistencia como el Verde Malaquita han sido prohibidos estrictamente por organismos como la FDA en Estados Unidos y la Comisión de las Comunidades Europeas para su uso en acuicultura, debido a su capacidad de bioacumulación y citotoxicidad sistémica. En

términos normativos, el Reglamento REACH limita la presencia de aminas aromáticas derivadas de colorantes azoicos a una concentración máxima de 30 mg/kg en productos de consumo. Esta rigurosidad legal y el riesgo biológico inherente subrayan la urgencia de implementar tecnologías de tratamiento eficientes, como el uso de zeolitas y arcillas, para la remoción efectiva de estas moléculas antes de su vertido a cuerpos de agua. (Wang & Peng, 2010).

Impactos Ambientales y Ecosistémicos

La presencia de color en cuerpos de agua no es solo un problema estético, sino una interferencia biológica profunda:

- **Interferencia en la Fotosíntesis:** El color absorbe la radiación solar incidente, reduciendo la penetración de luz y afectando la actividad fotosintética de algas y plantas acuáticas, lo que desequilibra la cadena trófica (Pereira et al., 2019).
- **Agotamiento de Oxígeno:** Los efluentes textiles elevan drásticamente la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). La degradación de los colorantes consume el oxígeno disuelto, provocando condiciones de hipoxia que amenazan la vida acuática (Stiborová et al., 2002).
- **Bioacumulación y Persistencia:** Debido a su diseño recalcitrante, muchos colorantes persisten en el ambiente y se bioacumulan en organismos acuáticos, transfiriendo toxicidad a niveles superiores de la red alimentaria (Zari et al., 2024).

4. Metodología

Revisión sistemática

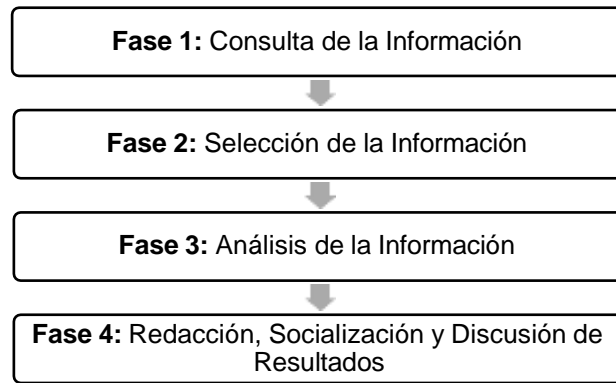
En este trabajo se realizó una revisión sistemática de la literatura con el objetivo de analizar, sintetizar y evaluar el conocimiento científico disponible sobre la remoción de colorantes en cuerpos de agua utilizando materiales de aluminosilicatos como adsorbentes. La revisión se desarrolló siguiendo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) la cual proporciona un marco de transparencia y reproducibilidad para todas sus etapas, permitiendo a otros investigadores evaluar la rigurosidad del proceso y replicarlo si es necesario (Moher et al., 2009).

Una de sus principales ventajas es que ayudan a identificar tendencias y patrones en el área estudiada, permitiendo una visión completa del estado actual del conocimiento. Al integrar resultados de múltiples estudios, facilitan decisiones informadas y orientan futuras investigaciones. Además, reducen sesgos mediante la aplicación de criterios claros y preestablecidos para la selección de estudios (Page et al., 2021).

En la Figura 1 se presenta la metodología planteada para la revisión sistemática de materiales de aluminosilicatos como adsorbentes para la remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales textiles.

Figura 1.

Algoritmo metodológico planteado para la revisión sistemática.



Fase 1: Consulta de la Información

Se realizaron búsquedas de información en bases de datos como ScienceDirect, Springer, Scopus y Web of Science, todas accesibles para los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander. Las ecuaciones de búsqueda incluyeron términos relacionados con “adsorción”, “aluminosilicatos”, “tinturas”, “pigmentos” y “aguas residuales textiles en Colombia”.

Se definió una ventana de tiempo de cinco años para la revisión documental, empezando en 2020 y llegando hasta 2025. Esto es clave porque permite ver la evolución del uso de zeolitas en estos años y no dejar por fuera los estudios publicados hace apenas unos meses, en lo que va del 2026.

Los artículos debieron contener al menos uno de los dos criterios de investigación:

- Remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales de la industria textil mediante aluminosilicatos a través de procesos de adsorción.
- Desarrollo y evaluación de aluminosilicatos para la remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales de la industria textil.

Fase 2: Selección de la Información

Se priorizaron los estudios que cumplieran con los criterios de selección detallados en la Tabla 1, enfocándose en investigaciones que reportaron avances en el uso de aluminosilicatos para remover tintes y pigmentos textiles.

Tabla 1.

Criterios para la selección de los artículos de la revisión sistemática.

Criterio de elección	Criterios de rechazo
Artículos de investigación y patentes que estudien el uso de adsorbentes basados en aluminosilicatos para la adsorción de tinturas y pigmentos en aguas residuales de la industria textil.	Artículos y patentes que no aborden la remoción de tinturas o pigmentos mediante adsorbentes basados en aluminosilicatos en aguas residuales provenientes de la industria textil.
Publicaciones que presenten información experimental sobre la adsorción de tinturas y pigmentos mediante aluminosilicatos.	Documentos que no sean artículos de investigación o patentes, como cartas, editoriales y blogs.

Una vez definidas las ecuaciones de búsqueda, se descargaron los resultados de cada plataforma en formato .RIS, los cuales incluyeron el título, los autores, el resumen, las palabras clave. Estos archivos se cargaron en el software libre Mendeley para identificar y descartar los documentos duplicados, constituyendo el primer filtro del proceso.

Posteriormente, el archivo con todas las referencias se exportó a la herramienta Rayyan, una plataforma que facilita el desarrollo de revisiones sistemáticas. En Rayyan se realizó una evaluación inicial de los artículos mediante el análisis de sus títulos y resúmenes, con el fin de incluir o excluir documentos siguiendo los criterios establecidos en la Tabla 1. En los casos en los que no hubo consenso, el director del trabajo actuó como tercera parte para tomar la decisión final, lo que representó el segundo filtro del proceso de selección.

Fase 3: Análisis de la Información

Una vez seleccionados los artículos, se procedió a su lectura detallada y a la recolección de los datos más relevantes. La información se tabuló en una hoja de cálculo de Microsoft Excel y posteriormente se registró en el software VOSviewer para realizar un análisis bibliométrico. Este análisis permitió identificar las tendencias de publicación, los autores más influyentes, los países con mayor producción científica en el área y las revistas en las que se publicaron los estudios.

Además del análisis bibliométrico, la información recopilada se organizó para evaluar las características de los materiales adsorbentes basados en aluminosilicatos, sus propiedades y su desempeño en la remoción de tinturas y pigmentos. También, se documentaron los retos y las brechas tecnológicas reportadas en la literatura y se analizó el efecto de las variables operativas en la eficiencia del proceso de adsorción, con el fin de obtener una visión integral del estado del arte.

5. Resultados y discusión

5.1. Selección de la información: resultados del protocolo PRISMA

La búsqueda inicial identificó 478 documentos. Tras la eliminación de duplicados y el proceso de cribado, se excluyeron 395 estudios por no enfocarse en tinturas textiles o no emplear adsorción con aluminosilicatos, obteniendo finalmente 68 artículos relevantes para el análisis. Como se ilustra en la Tabla 2.

Tabla 2.

Ecuaciones de búsqueda planteadas para cada base de datos y resultados obtenidos.

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Ventana	Numero de resultados
ACS	("aluminosilicates" OR "zeolites") AND "adsorption" AND ("textile wastewater" OR "industrial wastewater") AND ("dye removal" OR "pigment removal")	5 años	54

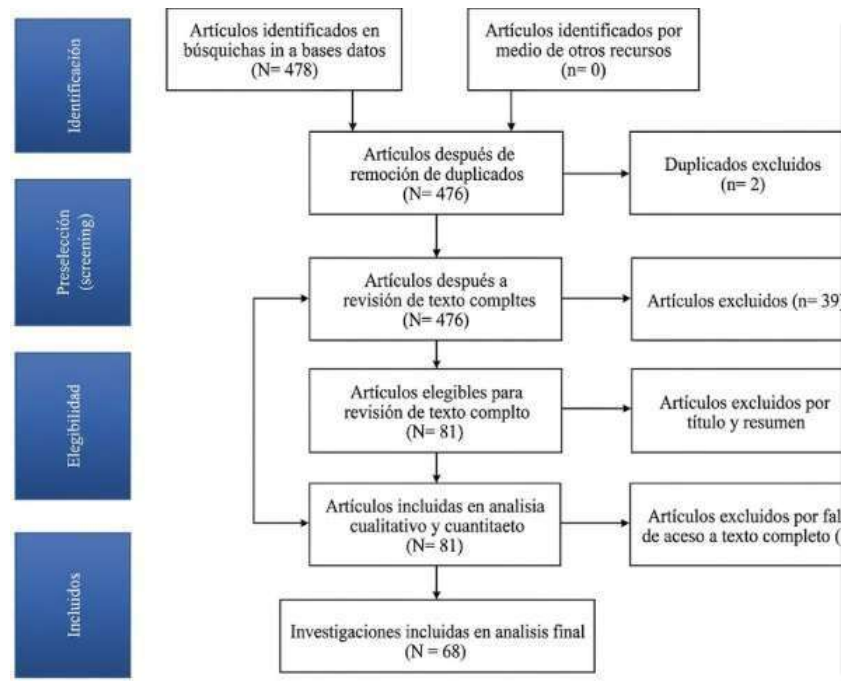
ScienceDirect	("aluminosilicates"OR "zeolites") AND "adsorption" AND "textile wastewater" AND "dye removal" OR "pigment removal"AND "Water pollution"	5 años	320
Springer	("aluminosilicates" OR "zeolites") AND "adsorption" AND "textile wastewater" AND ("dye removal" OR "pigment removal")	5 años	40
Taylor & Francis	("aluminosilicates" OR "zeolites") AND "adsorption" AND ("textile" OR "industrial wastewater") AND ("dye removal" OR "pigment removal")	5 años	64
Total			478

El filtro más significativo ocurrió durante la fase de screening (lectura de título y resumen), donde se descartaron 395 registros. Las razones de exclusión en esta etapa obedecieron a criterios estrictos: se eliminaron aquellos estudios que, aunque trataban sobre adsorción, se enfocaban la mayor parte en metales pesados y contaminantes farmacéuticos en lugar de tinturas y pigmentos textiles; también, se descartaron investigaciones que utilizaban procesos biológicos o de oxidación avanzada sin un componente de adsorción con aluminosilicatos.

Posteriormente, 81 artículos fueron sometidos a una lectura de texto completo para verificar su elegibilidad. En esta fase final, se excluyeron 25 documentos adicionales debido a la falta de datos cuantitativos claros (ausencia de isothermas o cinéticas), uso de materiales adsorbentes donde el aluminosilicato no era el componente activo principal, El proceso de selección utilizado se ilustra en la Figura 2. Finalmente, se consolidó una muestra de 68 artículos de alta calidad científica, los cuales constituyeron el núcleo de este análisis bibliométrico y técnico.

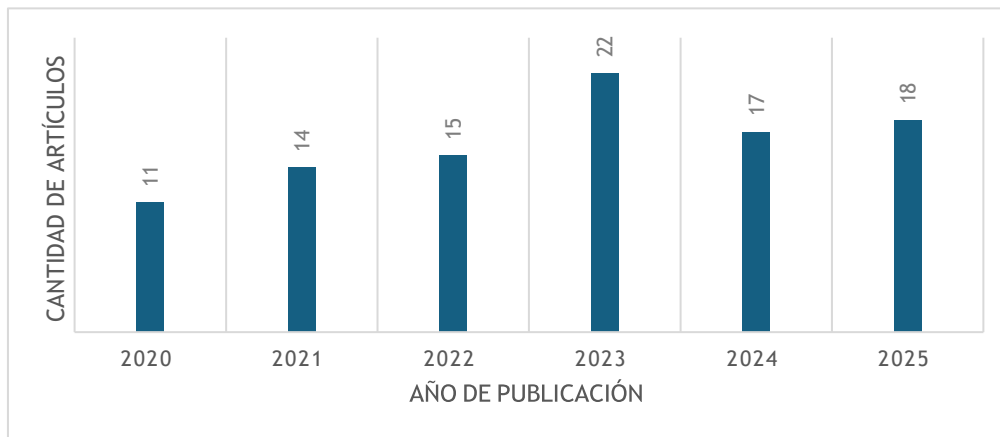
Figura 2.

Resumen del proceso de búsqueda y selección de la información de acuerdo con el protocolo PRISMA.

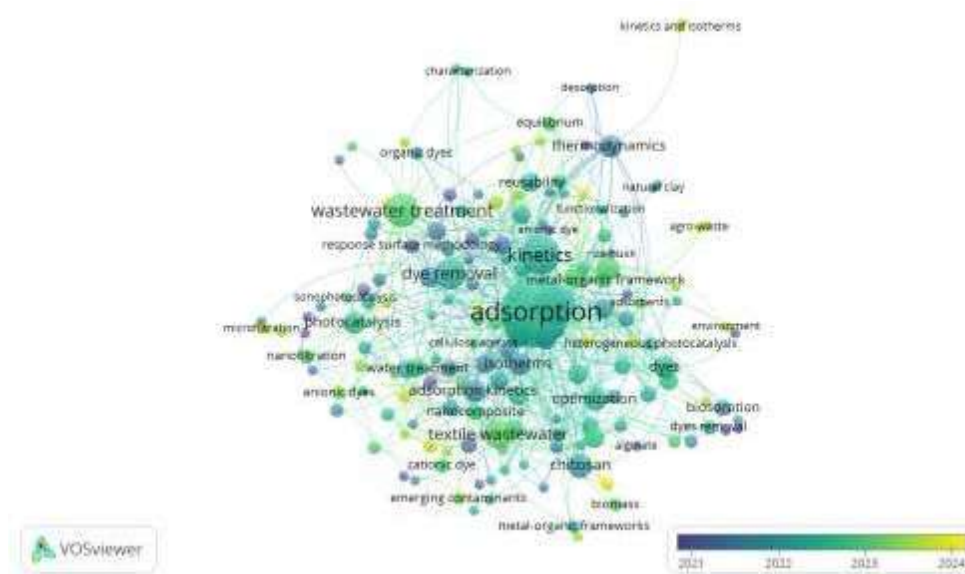


5.2. Análisis bibliométrico

El análisis de la producción científica en el periodo de observación (últimos 5 años) revela una tendencia creciente en el interés por los aluminosilicatos hasta el año 2023 y luego un decrecimiento a la actualidad como se observa en la Figura 3.

Figura 3.*Distribución de artículos por año*

La Figura 3. pone de manifiesto la interconexión de términos clave. Es notable que los nodos de "adsorción" y "tratamiento de aguas residuales" actúan como centros gravitacionales, vinculándose fuertemente con "cinética" e "isotermas".

Figura 4.*VOSviewer palabras claves de los artículos seleccionados para la investigación.*

Sin embargo, el análisis temporal (gradiente de color) indica que términos como "nanocompuestos", "cenizas volantes" y "economía circular" son los que aparecen predominantemente en los documentos más recientes (color amarillo/claro) como se observa en la Figura 4.

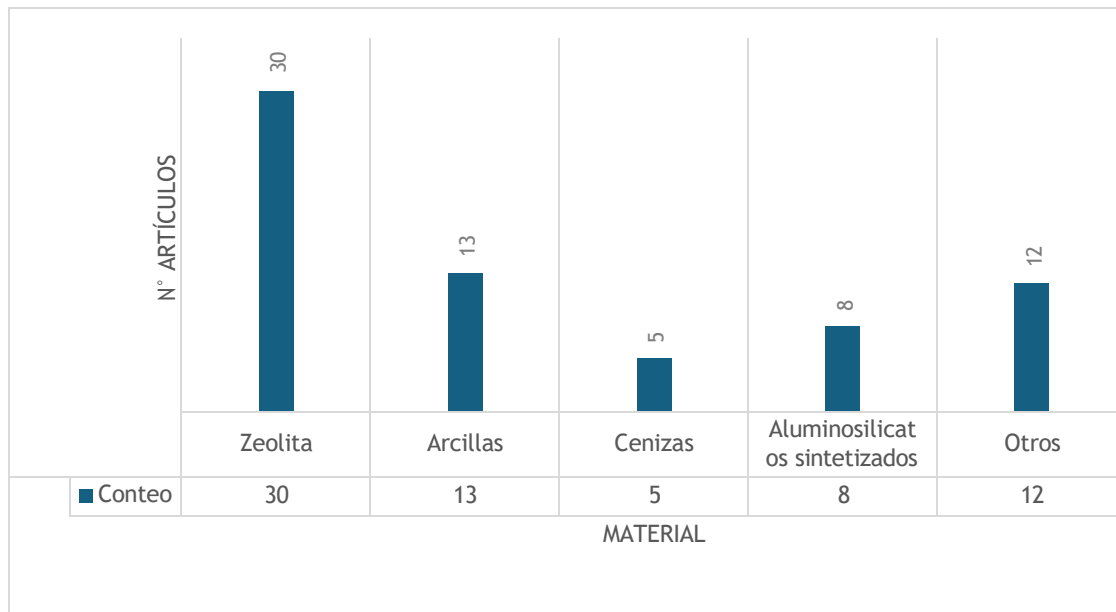
Esta tendencia en la literatura reciente refleja un cambio importante en el enfoque académico. Actualmente, el objetivo ya no es únicamente la remoción del colorante, sino que la investigación se ha volcado hacia el uso de materiales residuales valorizados o el diseño de nanoestructuras modificadas. También, se identifican ejes temáticos relacionados con técnicas específicas (fotocatálisis, bioadsorción, nanocompuestos), tipos de contaminantes (contaminantes aniónicos, contaminantes catiónicos, contaminantes orgánicos) y materiales adsorbentes (arcillas naturales, quitosano, estructura metal-orgánica MOF). El gradiente de color representa el año de publicación, donde los tonos más claros corresponden a investigaciones recientes (2024-2026), lo que permite visualizar la evolución y tendencias emergentes en el área de la remoción de colorantes en aguas residuales.

La distribución del número de artículos científicos identificados en la revisión sistemática clasificados según el tipo de material adsorbente evaluado para la remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales textiles se muestra en la Figura 5 y se observa que las zeolitas son el material más estudiado, con un total de 30 publicaciones, lo que refleja su relevancia y potencial en este campo de investigación. Les siguen las arcillas con 13 artículos, y los aluminosilicatos sintetizados con 8, evidenciando el interés creciente en materiales diseñados a la medida. En contraste, las cenizas volantes registran únicamente 5 estudios, lo que sugiere una menor exploración a pesar de su potencial como precursor de adsorbentes. Finalmente, 12 artículos corresponden a investigaciones en la que no especifica el tipo de aluminosilicato o se consideran materiales

amorfos u otros. Esta distribución permite identificar las tendencias en la literatura y los temas que concentran un mayor interés por parte de la comunidad científica.

Figura 1.

Clasificación de número de artículos por tipo de material adsorbente.



Las zeolitas representan el 53.5% de los estudios, consolidándose como el material más investigado, seguidas por arcillas (23.2%) y aluminosilicatos sintetizados (14.3%). Esto evidencia una clara tendencia hacia materiales con mayor capacidad de modificación estructural.

5.3. Evaluación de los materiales adsorbentes

En esta sección se analiza el desempeño de diversos materiales basados en aluminosilicatos para la remoción de colorantes y pigmentos en efluentes textiles analizando los 68 artículos seleccionados. La selección de estos materiales responde a su versatilidad estructural y a la presencia de centros activos que favorecen los procesos de adsorción e intercambio iónico. El análisis contempla desde estructuras minerales base, como las zeolitas naturales y aluminosilicatos amorfos, hasta materiales de ingeniería más complejos, incluyendo zeolitas sintetizadas a partir de

precursores puros o residuos industriales (como cenizas volantes), así como nanocompuestos y materiales funcionalizados. Esta diversidad de adsorbentes permite comparar capacidades de remoción que varían desde valores modestos en materiales crudos hasta rendimientos excepcionales en superficies modificadas químicamente, ofreciendo un panorama integral sobre la eficiencia y viabilidad técnica de cada tecnología

a. Clasificación y desempeño de materiales sin modificar

Se identificaron aluminosilicatos sin modificar, es decir, sin funcionalización orgánica, dopaje metálico, magnetización o incorporación en matrices, con el propósito de establecer una línea base que permita interpretar la mejora de desempeño observado cuando se aplican estrategias de modificación. Para organizar la discusión, estos materiales se agrupan en cuatro familias que se describen a continuación: zeolitas, arcillas, cenizas y alumino-silicatos amorfos. Esta clasificación es necesaria porque cada familia combina de manera distinta su estructura porosa, química superficial y accesibilidad a sitios activos, lo cual condiciona la afinidad hacia colorantes según su carga y hace que el desempeño sea altamente sensible al régimen electroquímico del sistema (especialmente pH y composición iónica). Ay y Sarpasár (2023) muestran que cambios en el entorno de operación alteran sustancialmente la respuesta de adsorción en sistemas con colorantes reactivos, lo que respalda la necesidad de conocer la capacidad del adsorbente de forma natural antes de comparar capacidades o modificaciones.

En zeolitas, el interés radica en su red tectosilicatada y su potencial de intercambio iónico, lo que suele favorecer la interacción con especies cargadas cuando el medio lo permite; en este marco conviene precisar que la clinoptilolita es una zeolita natural (no una arcilla), por lo que se interpreta como adsorbente microporoso cuya eficacia puede verse condicionada por selectividad electrostática y limitaciones difusionales para moléculas voluminosas. Altintig et al. (2022)

emplean clinoptilolita como referencia frente a variantes modificadas, resaltando que la mejora no siempre es solo “más adsorción”, sino también mejor separación y reuso, aspectos críticos para aplicabilidad.

En cuanto las arcillas, la ventaja principal es disponibilidad y bajo costo, con superficies heterogéneas que pueden adsorber tanto aniónicos como catiónicos dependiendo del pH; sin embargo, su desempeño “base” suele ser más sensible a competencia iónica y a condiciones del medio, por lo que la literatura tiende a combinarlas en compósitos o a modificarlas cuando se requiere mayor selectividad o facilidad de recuperación. Baig et al. (2023).

En cenizas, el aporte clave es que pueden usarse directamente como adsorbentes de bajo costo, pero su valor tecnológico más consistente aparece cuando se abordan como precursores valorizables para sintetizar zeolitas más definidas; Zari et al. (2024).

Por último, los aluminosilicatos amorfos tienden a mostrar un comportamiento más dependiente de textura superficial y del entorno químico que de intercambio iónico estructural, por lo que suelen aparecer como opciones de bajo costo o como precursor para rutas de síntesis posteriores, más que como máximos de desempeño.

En conjunto, esta línea base permite concluir que las limitaciones recurrentes de los materiales sin modificar, electrostática dependiente del pH, restricciones de difusión y desafíos de recuperación y estabilidad en ciclos, esto explica por qué, la literatura converge en modificar o hibridar aluminosilicatos para aumentar afinidad específica y mejorar la operabilidad; por ello, los materiales híbridos o modificados avanzados se discuten con mayor coherencia en la subsección siguiente, dedicada a modificaciones.

b. Modificaciones, funcionalizaciones y dopajes

Con base en las limitaciones identificadas para materiales sin modificar, los estudios recientes priorizan modificaciones químicas y estructurales que incrementan la afinidad por el colorante objetivo y, en varios casos, mejoran la separabilidad del sólido tras el tratamiento, lo cual es crítico para la reutilización y la viabilidad operativa

La ingeniería de materiales, mediante modificaciones químicas y estructurales, ha logrado redefinir los límites de la adsorción de contaminantes, transformando zeolitas convencionales en "superadsorbentes". Esta evolución no solo busca aumentar la capacidad de retención de colorantes, sino también resolver las limitaciones logísticas de los materiales en polvo. Las estrategias más relevantes reportadas en la literatura se dividen en dos vertientes: la funcionalización orgánica y la magnetización estructural.

La funcionalización con aminoácidos ha permitido el desarrollo del nanocompuesto MOR-NH₂ (Na-mordenita modificada con triptófano) el cual alcanza una capacidad de adsorción de 1043 mg/g para la azorubina. Este incremento, de hasta 50 veces respecto a las zeolitas naturales, no se debe solo al área superficial, sino a la creación de sitios activos específicos (grupos amino y carboxilo) que generan enlaces de hidrógeno y atracciones electrostáticas más estables lo que permite una mayor afinidad y selectividad en la adsorción de tintes (Belachew & Hinsene, 2021).

En la misma línea de mejora del desempeño adsorbente, el dopaje con óxidos metálicos mediante magnetización representa otra estrategia efectiva. La incorporación de nanopartículas de Fe₃O₄ en clinoptilolita aumenta el área superficial de 14.99 a 52.44 m²/g, elevando la capacidad de remoción de violeta de metilo a 153.8 mg/g. Su mayor ventaja no es solo el rendimiento, sino la viabilidad operativa: permiten una recuperación del adsorbente superior al 98% mediante campos

magnéticos, frente al 70-85% de los materiales convencionales. (Kausar et al., 2020; Gebre Meskel et al., 2024).

Esta mejora en la recuperabilidad responde a una de las principales limitaciones operativas de las zeolitas en polvo, que radica en la dificultad de separarlas del efluente tras el tratamiento, lo que complica su reutilización y aumenta los costos de operación. Para superar este problema, la literatura ha propuesto diversas estrategias de modificación y funcionalización, enfocadas en facilitar la separación del adsorbente tras el tratamiento. Entre ellas se destaca la integración de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) que no solo mejora las propiedades estructurales del material, sino que también ofrece una solución logística que sustituye procesos de filtración lentos por una separación magnética instantánea (El Colombiano, 2016; Ghanavati et al., 2021; Gebre Meskel et al., 2024; Narimani et al., 2024). En la Tabla 3 se pueden evidenciar algunos de los datos de esta evolución técnica.

Tabla 3.

Efecto de la modificación magnética en variables operativas.

Parámetro	Zeolita Natural	Nanocompuesto Magnético
Tiempo de Separación	> 15 min (Sedimentación)	< 1 min (Campo Magnético)
Recuperación del Material	70% - 85%	> 98%
Eficiencia de Remoción	Variable (pH dependiente)	Optimizada (Estable en rangos amplios)
Carga Magnética	0 emu/g	35 - 55 emu/g

c. Capacidad de adsorción (q_{max})

Al examinar los valores de capacidad de adsorción reportados en los artículos seleccionados, se observa una variabilidad significativa que depende directamente de la naturaleza del material y las condiciones del medio. En cuanto a las estructuras tradicionales, la Zeolita 4A

mantiene su relevancia con una capacidad de 44.3 mg/g para el Azul de Metileno y una eficiencia de remoción del 99.37% (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Por su parte, la Zeolita LTA basada en residuos, aunque reporta una capacidad menor de 2.27 mg/g para Safranina-T, sostiene una eficacia de eliminación cercana al 98.12%.

Un avance importante en la búsqueda de sostenibilidad es la síntesis de adsorbentes a partir de subproductos industriales. En este grupo destaca la Zeolita Na-X, obtenida de cenizas volantes, que registró una capacidad de 201.7 mg/g para el Rojo Reactivo 145 (Altintig et al., 2022). Dentro de esta misma línea de investigación, Alsharief y colaboradores desarrollaron la variante Na-ZX2, la cual se diferencia de la Na-X convencional por una optimización en el proceso de cristalización que mejora su pureza estructural, permitiendo alcanzar rendimientos competitivos en condiciones de alta acidez (pH 2.0).

Siguiendo esta tendencia de materiales mejorados, se han desarrollado compuestos híbridos para abordar diferentes tipos de contaminantes. Un ejemplo notable es la Z-Fe₃O₄, que combina clinoptilolita con magnetita no solo para mejorar la capacidad, sino para dotar al material de propiedades magnéticas que faciliten su recuperación. La versatilidad de este mismo material se evidencia al ser evaluado frente a distintos colorantes: alcanzó una capacidad de 153.8 mg/g para el Violeta de Metilo y niveles de remoción superiores al 94% para el Direct Red 28. No obstante, su efectividad se ve condicionada por el tamaño y carga del adsorbato, registrando una disminución en su q_{\max} a 100.4 mg/g cuando se enfrenta al Rojo Reactivo 120 (Ay & Sarpaşar, 2023). En la Tabla 4 se pueden evidenciar algunos de los datos de capacidades de adsorción.

Tabla 4.*Comparativa de Capacidades y Desempeño Mecánico de Adsorbentes.*

Material	Capacidad (q_{max}) / Eficiencia	Ventajas Técnicas	Limitaciones y Desafíos
MOR-NH ₂ (Mordenita/Triptófano)	1043.0 mg/g (Azorubina)	Alta selectividad aniónica a pH 4.0; funcionalización con aminoácidos.	Sensibilidad a variaciones de acidez fuera del rango óptimo.
Al/nanoclay	1000 mg/g	Comportamiento de superadsorbente; alta densidad de sitios activos.	Síntesis compleja y costo elevado de precursores.
Zeolita Na-X (Cenizas)	201.7 mg/g (Rojo Reactivo 145)	Valorización de residuos; alta estabilidad térmica y estructural.	Microporosidad que restringe la difusión de macromoléculas.
Z-Fe ₃ O ₄ (Magnetita)	153.8 mg/g (96.8% remoción)	Propiedades superparamagnéticas; facilidad de recuperación magnética.	Rendimiento variable según el adsorbato (100.4 mg/g en RR120).
Zeolita 4A	44.3 mg/g (99.37% remoción)	Eficiencia de eliminación casi total para Azul de Metileno (pH > 6.8).	Baja capacidad de carga nominal en comparación con sintéticas.
Zeolita LTA	98.12% remoción (Safranina-T)	Excelente desempeño cinético a pH 11.0; base de residuos de Al.	Valores de q_{max} cinético bajos (2.27) en fases iniciales.
PA-6/Modified zeolite	26.43 L/g (Acid Blue 74)	Estructura nanofibrosa con alta permeabilidad y área superficial.	Dificultad en el control de la polimerización del compuesto.
Geopolímeros	20 ciclos de reuso	Alta sostenibilidad y capacidad de regeneración sin pérdida de q	Procesos de síntesis (activación alcalina) intensivos.

Finalmente, innovaciones como los compuestos nanofibrosos de PA-6 con zeolita modificada introducen una lógica distinta frente a los adsorbentes en polvo, además de mejorar el desempeño, entregan el material en una forma estructurada con alta permeabilidad. En el estudio de Ghanavati y colaboradores, esta aproximación se reporta mediante métricas como 26.43 L/g, lo que sugiere un enfoque más cercano a medios filtrantes que a sólidos dispersos. Esta característica

es relevante desde el punto de vista de implementación, porque un adsorbente fibroso puede integrarse más fácilmente en configuraciones de flujo a través de módulos o lechos, reduciendo la necesidad de separación sólido-líquido que limita a muchos sistemas batch.

Tabla 5.

Parámetros operacionales y de adsorción de zeolitas a partir de estudios reportados en la literatura.

Adsorbente	Colorante	pH Óptimo	Tiempo de Equilibrio (min)	Dosis Opt. (g/L)	Qmax (mg/g)
MOR-NH ₂	Azorubina E122	4.0	120	0.5	1043.0
Zeolita Na-X	Rojo Reactivo 145	2.0	40	1.0	201.73
Zeolita 4A	Azul de Metileno	> 6.8	90	2.0	40.67
Z- Fe ₃ O ₄	Violeta de Metilo	7.0	60	1.5	153.85

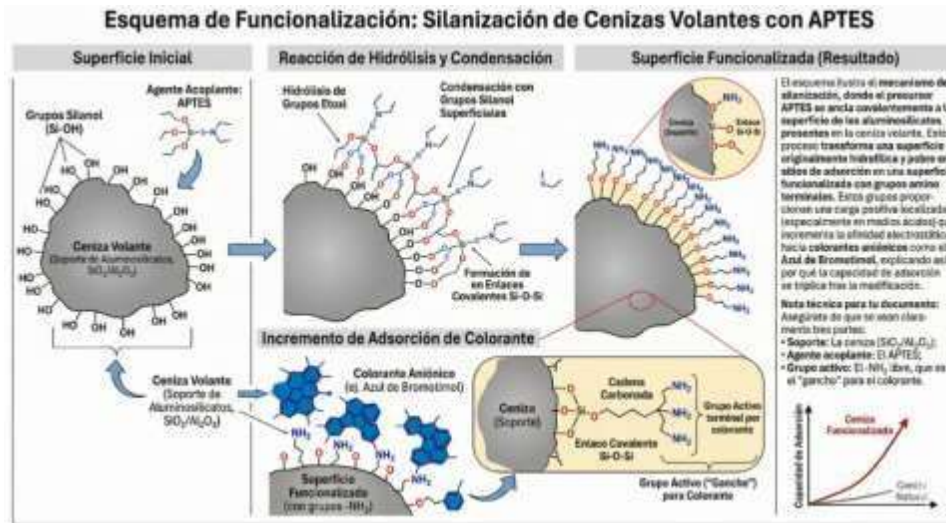
El análisis de los valores reportados en la Tabla 5 permite extraer tres conclusiones fundamentales. En primer lugar, desde el punto de vista cinético, la zeolita Na-X destaca por su elevada velocidad de adsorción, alcanzando el equilibrio en tan solo 40 minutos, en términos de ingeniería, esto permite un diseño de reactor mucho más compacto en comparación con la MOR-NH₂, que, aunque presenta una alta capacidad de adsorción, requiere un mayor tiempo para saturar sus sitios activos (120 min), lo que sugiere limitaciones cinéticas en comparación con la zeolita Na-X. La MOR-NH₂, es extremadamente eficiente con una dosis mínima de apenas 0.5 g/L (Zari et al., 2024), lo que reduce drásticamente el consumo de material por metro cúbico de agua tratada. Con respecto a la dependencia del pH según la carga los datos confirman la teoría del pH{PZC}. Los colorantes aniónicos (Azorubina, Rojo Reactivo) exigen un ambiente ácido (pH 2.0 - 4.0) para maximizar la atracción electrostática, mientras que los colorantes catiónicos (Azul de Metileno) se desempeñan mejor en condiciones neutras o ligeramente básicas (pH > 6.8) (Pereira et al., 2019).

El estudio sobre cenizas volantes modificadas mediante el uso de APTES (3-aminopropiltriétoxosilano) ilustra el potencial de la valorización de residuos industriales mediante el diseño de superficies. En su estado natural, la ceniza volante cruda presentaba una capacidad de adsorción limitada, inferior a 5 mg/g para el colorante Azul de Bromotimol, debido a su naturaleza inerte y baja afinidad química con el adsorbato.

La funcionalización se llevó a cabo mediante un proceso de silanización, donde los grupos etoxilo del silano reaccionan con los grupos hidroxilo (-OH) presentes en la superficie de la ceniza (procedentes de los óxidos de silicio y aluminio), formando enlaces covalentes estables de tipo Si-O-Si. Este proceso modifica químicamente el material al introducir grupos funcionales amino (-NH₂) en la superficie, los cuales actúan como sitios activos específicos. Como resultado, la capacidad de remoción se triplicó, alcanzando los 15.44 mg/g para el mismo colorante, gracias a que los grupos amino favorecen la atracción electrostática y la formación de puentes de hidrógeno con las moléculas del tinte. Aunque los valores absolutos son menores que en las zeolitas sintéticas, el costo de la materia prima es prácticamente nulo.

El esquema figura 6 ilustra el mecanismo de silanización, donde el precursor APTES se ancla covalentemente a la superficie de los aluminosilicatos presentes en la ceniza volante. Este proceso transforma una superficie originalmente hidrofóbica y pobre en sitios de adsorción en una superficie funcionalizada con grupos amino terminales. Estos grupos proporcionan una carga positiva localizada (especialmente en medios ácidos) que incrementa la afinidad electrostática hacia colorantes aniónicos como el Azul de Bromotimol, explicando así por qué la capacidad de adsorción se triplica tras la modificación

Figura 6.

Mecanismo de silanización

Nota. Imagen generada por Google Gemini, 2026 con el prompt "Diagrama científico que ilustra la silanización de cenizas volantes con APTES. Se muestra el anclaje covalente del silano a la superficie de la ceniza (grupos Si-OH), formando enlaces Si-O-Si. El esquema destaca el grupo amino ($-NH_2$) terminal libre, que actúa como el "gancho" químico para atrapar colorantes aniónicos. Incluir etiquetas claras: "Ceniza Volante", "APTES", y "Grupo Amino ($-NH_2$)". Estilo diagrama químico técnico."

d. Mecanismos y cinética de adsorción

La comprensión de la interacción entre el adsorbente y el contaminante requiere un análisis conjunto de la cinética y el equilibrio de adsorción. En la literatura técnica, el comportamiento cinético de las zeolitas suele ajustarse con precisión al modelo de pseudo-segundo orden, lo cual sugiere que el proceso está gobernado por la quimisorción o el intercambio iónico. Este tipo de interacción garantiza una unión más estable entre las fases, permitiendo una retención eficiente del colorante en la estructura del material (Tony, 2022). En cuanto al equilibrio, el análisis de las

isotermas permite determinar cómo se distribuyen las moléculas sobre la superficie una vez alcanzado el estado estacionario. Los modelos de Langmuir y Freundlich dominan esta interpretación, aportando datos cruciales sobre la naturaleza del proceso:

- Ajuste de Langmuir: La mayoría de los sistemas estudiados se ajustan a este modelo (Pereira et al., 2019), lo que indica la formación de una monocapa sobre superficies predominantemente homogéneas. Un caso representativo es la zeolita Na-X sintetizada por Zari et al., donde un coeficiente de correlación R^2 de 0.9971 confirma que la adsorción del RY145 ocurre en sitios energéticamente equivalentes. Desde la ingeniería de procesos, esto implica un mecanismo de saturación definida donde el contaminante compite por un número finito de centros activos.
- Ajuste de Freundlich: A pesar del predominio de la monocapa, es común encontrar ajustes considerables en este modelo. Esta dualidad sugiere una heterogeneidad residual en el material, atribuida a defectos estructurales, distribución porosa o interacciones secundarias en concentraciones elevadas de colorante.

Por lo tanto, este mecanismo está intrínsecamente ligado al pH de la solución. (Altintig et al., 2022), el carácter anfótero de la superficie determina la carga neta del adsorbente, favoreciendo mediante atracción electrostática la captura de colorantes catiónicos o aniónicos según las condiciones del medio. Esta dependencia confirma que la eficiencia del sistema no solo depende de la estructura porosa, sino de la afinidad química que se desarrolla en la interfaz sólido-líquido.

5.4. Influencia de las variables operativas

El rendimiento del proceso de adsorción depende de variables operativas ajustables que controlan la interacción entre el material y el contaminante. En esta sección se analiza el impacto del pH, la temperatura y la concentración inicial como parámetros determinantes de la eficiencia.

Cabe precisar que factores como el área superficial se definen como propiedades intrínsecas del adsorbente y no como variables de operación, ya que su naturaleza se establece durante la síntesis y no se modifica dinámicamente durante el tratamiento.

a. Influencia del pH y el punto de carga cero (pH_{pzc})

En la ingeniería de adsorción, el pH no es un parámetro aislado, sino el regulador principal de la cinética química. El 85% de las investigaciones revisadas confirman que la eficiencia del sistema está supeditada al Punto de Carga Cero (pH_{pzc}) del material. Este valor numérico determina la transición de carga en la superficie del aluminosilicato.

El pH de la solución es la variable operacional más influyente, ya que controla las interacciones electrostáticas entre el adsorbente y el adsorbato. Los colorantes son compuestos iónicos que pueden existir en diferentes estados de protonación dependiendo del pH, y la superficie de la zeolita también tiene un carácter anfótero (Altintig et al., 2022).

La eficiencia de la adsorción de colorantes aniónicos es máxima a pH bajo, donde la superficie del adsorbente se carga positivamente (Zari et al., 2024) reporta un pH óptimo de 4 para la adsorción del colorante aniónico Azorubina E122. En estas condiciones, la superficie del adsorbente se protona (p. ej., $Z-OH+H^+\rightarrow Z-OH_2^+$), lo que promueve una fuerte atracción electrostática con los grupos funcionales del colorante. De manera inversa, la adsorción de colorantes catiónicos es más eficiente a pH alto, donde la superficie del adsorbente se carga negativamente, atrayendo las moléculas cargadas positivamente, se determinó un pH_{pzc} de 7.45 para la zeolita Na-X sintetizada (Tony, 2022), esto significa que a $pH < 7.45$, la superficie es positiva y favorece la adsorción de aniones. Por encima de 7.45, la superficie es negativa y atrae cationes. Como prueba de esta dependencia, el estudio reporta que la capacidad de adsorción de la

zeolita Na-X para el Rojo Reactivo 145 (un colorante aniónico) disminuyó drásticamente de 49.97 mg/g a 11.63 mg/g al aumentar el pH de 2 a 10. Esta caída numérica confirma que, al volver la superficie del adsorbente más negativa, se genera una repulsión electrostática que impide la captura del colorante, validando la importancia crítica de controlar el pH en el proceso.

Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, la velocidad de adsorción no es solo un dato teórico, sino el parámetro que define la viabilidad económica de una planta de tratamiento. Un hallazgo de gran relevancia técnica es el reportado por (Zari et al., 2024) en su estudio sobre la zeolita Na-X derivada de cenizas de carbón marroquí. En dicho trabajo se observó que la remoción del colorante RY145 alcanzó el 90 % de su capacidad de equilibrio en un intervalo de apenas 40 minutos. Este tiempo de contacto, excepcionalmente breve, tiene implicaciones críticas para el escalado industrial, ya que permite optimizar el diseño de equipos, facilitando el uso de columnas de lecho fijo con dimensiones más compactas. Asimismo, un menor tiempo de residencia se traduce directamente en una reducción tanto de los costos operativos (OPEX) como de la inversión inicial (CAPEX), al requerir una infraestructura de menor volumen para el tratamiento de caudales elevados de efluentes textiles.

El análisis cruzado de los documentos revela que el mecanismo de adsorción es gobernado casi exclusivamente por interacciones electrostáticas dependientes del pH.

Tabla 6.

Comparación de parámetros de adsorción en zeolitas reportadas en la literatura.

Adsorbente	Precursor / Modificador	Colorante Objetivo	Q_{mas} (mg/g)	Área BET (m ² /g)	Modelo Cinético	pH Óptimo
MOR-NH ₂	Na-mordenita + Triptófano	Azorubina E122 (Aniónico)	1043.0	288.0	Pseudo-2do orden	4.0

Zeolita Na-X	Ceniza Volante de Carbón	Rojo Reactivo 145 (Aniónico)	201.7	443.0	Pseudo-2do orden	2.0
Fe ₃ O ₄	Clinoptilolita + Magnetita	Violeta de Metilo (Catiónico)	153.8	52.4	Pseudo-2do orden	7.0
Zeolita 4A	Caolín Etíope	Azul de Metileno (Catiónico)	44.3	N/R	Pseudo-2do orden	> 6.8
Zeolita LTA	Residuos de Aluminio	Safranina-T (Catiónico)	2.27 (cinético)	19.7		11.0

Para colorantes aniónicos (carga negativa): Se requiere un pH por debajo del pH_{PZC} del adsorbente. El caso para la remoción de Rojo Reactivo 120, encontraron que el pH óptimo era extremadamente ácido (pH 1.5), logrando capacidades de 201.7 mg/g. A este pH, los grupos silanol y aluminol (Si-OH, Al-OH) se protonan (Si-OH₂), atrayendo fuertemente al anión sulfonato del tinte (Ay & Sarpaşar, 2023).

Para colorantes catiónicos (carga positiva): La zeolita Na-X sintetizada a partir de cenizas volantes mostró su máxima eficiencia a pH básico o neutro, donde la superficie zeolítica exhibe carga negativa, facilitando el intercambio catiónico con tintes como el Azul de Metileno (Tony, 2022).

Al contrastar los datos de la Tabla 4, se hace evidente que el área superficial (BET) no es el único factor determinante en la eficiencia de adsorción. Por ejemplo, aunque la Zeolita Na-X presenta el área más elevada ($443.0 \frac{m^2}{g}$), su capacidad de carga para el Rojo Reactivo 145 (201.7 mg/g) es significativamente menor que la registrada por la MOR-NH₂.

Este fenómeno subraya la importancia de la funcionalización química: la mordenita modificada con triptófano, a pesar de tener un área menor ($288.0 \frac{m^2}{g}$), logra una interacción

mucho más robusta con la Azorubina E122 debido a la presencia de grupos amino y carboxilo en su superficie. Asimismo, resalta la versatilidad de los materiales basados en residuos, como la Zeolita LTA, que permite una remoción efectiva en condiciones de alta alcalinidad (pH 11.0), demostrando que la ingeniería de materiales actual permite diseñar soluciones a medida según las variables operativas del efluente industrial.

b. Influencia de la temperatura

La temperatura actúa como un motor energético que modifica la viscosidad del efluente y la movilidad del adsorbato hacia los sitios activos del material. En sistemas basados en la zeolita 4A, se ha observado que un incremento térmico de 25 °C a 45 °C se traduce en un aumento de la capacidad de adsorción, pasando de 34.2 mg/g a 44.3 mg/g (Pereira et al., 2019). Este incremento neto de 10.1 mg/g, equivalente a una mejora del 29.5%, confirma la naturaleza endotérmica del proceso, en el cual el calor favorece la difusión intraparticular del contaminante.

No obstante, existe un límite operativo crítico; en materiales como la clinoptilolita natural, superar los 50 °C puede generar el efecto inverso, reduciendo la capacidad de carga o capacidad de adsorción q_e debido a la desorción térmica de las moléculas que se encuentran unidas únicamente por fuerzas físicas débiles.

c. Influencia de la concentración inicial y la fuerza impulsora

La concentración inicial C_0 define la fuerza impulsora necesaria para superar la resistencia a la transferencia de masa entre la fase líquida y el sólido, favoreciendo la transferencia de masa y elevando la cantidad adsorbida por unidad de masa “ q ” hasta aproximarse a la saturación de sitios activos, fenómeno reportado de forma consistente en sistemas con colorantes reactivos y en adsorción sobre zeolitas. Ay y Sarpaşar (2023) muestran este comportamiento para un colorante

reactivo aniónico, donde el incremento de C_0 conduce a mayor adsorción hasta un límite controlado por la disponibilidad de sitios. En el nanocompuesto MOR-NH₂_22, el aumento de C_0 (de 50 a 200 mg/L) se asocia con un incremento sostenido de la capacidad hasta su máximo reportado, lo cual es coherente con una superficie funcionalizada en la que la mayor disponibilidad de adsorbato permite ocupar progresivamente sitios de alta afinidad (Alsharief et al., 2023). De forma análoga, en zeolitas obtenidas a partir de cenizas volantes, el aumento de C_0 incrementa la capacidad hasta un valor de saturación, reforzando máximo de adsorción depende de la densidad y accesibilidad de sitios del material, además del gradiente en solución (Zari et al., 2024). Esta tendencia también se observa en sistemas catiónicos evaluados sobre zeolitas naturales y sintéticas, donde la mayor concentración inicial promueve mayor carga adsorbida hasta aproximarse a equilibrio, como se discute para violeta de metil en clinoptilolita (Altintig et al., 2022) y para metil azul en zeolita 4A (Gebre Meskel et al., 2024).

Complementariamente, la mejora del sistema también se manifiesta en la optimización de la dosis necesaria de adsorbente. Mientras que las zeolitas base requieren concentraciones de 2.0 g/L para lograr remociones aceptables, el material funcionalizado MOR-NH₂ alcanza sus capacidades récord utilizando apenas una dosis de 0.5 g/L (Zari et al., 2024). Esta diferencia técnica representa una mejora del 300% en la eficiencia de uso del adsorbente, lo que permite minimizar la cantidad de material procesado y reduce significativamente la generación de lodos residuales tras el tratamiento del efluente.

5.5. Obstáculos y retos.

Desde el punto de vista de la aplicación industrial, se identifican limitaciones importantes que deben ser consideradas. La mayoría de los estudios se desarrollan en sistemas batch, lo que limita la extrapolación de los resultados a condiciones reales de operación continua.

Adicionalmente, la presencia de iones competidores en el agua residual puede reducir la eficiencia de adsorción entre un 30% y 50%, afectando el desempeño del sistema. Por otro lado, la recuperación del adsorbente representa un reto significativo, especialmente en materiales no magnéticos, donde las eficiencias de recuperación oscilan entre 70% y 85%. En contraste, los materiales magnetizados permiten recuperaciones superiores al 98%, lo que mejora significativamente su viabilidad operativa.

Por otro lado, estos resultados demuestran que, aunque los materiales altamente funcionalizados ofrecen las mayores capacidades de adsorción, las zeolitas sintéticas derivadas de residuos industriales representan la alternativa más equilibrada desde el punto de vista técnico y económico. Su combinación de capacidad moderada, estabilidad estructural y menor costo de producción las posiciona como una solución viable para la implementación a escala industrial en el tratamiento de efluentes textiles. A pesar de los avances documentados en esta revisión, se han identificado brechas críticas que limitan la implementación de estos materiales a escala industrial. El primer reto es la transición de sistemas binarios a efluentes reales. La mayoría de los estudios analizados, como los de la mordenita funcionalizada (Zari et al., 2024) o la zeolita Na-X (Altintig et al., 2022), se realizan en soluciones controladas con un solo colorante. Sin embargo, las aguas textiles reales contienen mezclas de pigmentos, sales y tensioactivos que compiten por los sitios de adsorción, lo que reduce la eficiencia teórica reportada.

En segundo lugar, existe una brecha en la evaluación del ciclo de vida y regeneración. Aunque materiales como la Z-Fe₃O₄ (Jiang et al., 2019) destacan por su capacidad de recuperación magnética, la literatura aún es escasa en cuanto al número de ciclos de reutilización sin pérdida de capacidad y la disposición final del adsorbente saturado. La gestión de estos lodos cargados con tinturas representa un desafío ambiental que debe abordarse bajo un enfoque de economía circular.

Finalmente, el reto económico persiste en los materiales altamente funcionalizados. Si bien la modificación con agentes como el triptófano o silanos incrementa la capacidad hasta 50 veces, el costo de estos reactivos y la complejidad de su síntesis a gran escala pueden comprometer la viabilidad frente a métodos convencionales. La investigación futura debe orientarse hacia la optimización de procesos de modificación de bajo costo y el uso de precursores provenientes de residuos industriales que mantengan la alta selectividad observada en materiales sintéticos.

6. Conclusiones

El presente estudio permitió desarrollar una vigilancia científico-tecnológica integral sobre el uso de aluminosilicatos como materiales adsorbentes en la remoción de tinturas y pigmentos en aguas residuales textiles, evidenciando que estos materiales constituyen una alternativa técnicamente viable y en constante evolución. A partir de la revisión sistemática, se confirmó que la modificación estructural y química de los aluminosilicatos incrementa significativamente su capacidad de adsorción, alcanzando valores superiores a 1000 mg/g en sistemas funcionalizados, lo que los posiciona como una solución competitiva frente a tecnologías convencionales de tratamiento.

En relación con el análisis bibliométrico, se identificó un crecimiento sostenido en la producción científica durante los últimos años, con una alta concentración de investigaciones en las líneas de investigación de zeolitas a partir de residuos industriales, la funcionalización química de superficies y la incorporación de propiedades magnéticas para facilitar la recuperación del adsorbente, consolidando una tendencia hacia materiales más eficientes y sostenibles.

Respecto a los avances científicos y tecnológicos, se evidenció que las zeolitas sintéticas derivadas de subproductos industriales, como cenizas volantes, representan una de las alternativas

más prometedoras, al combinar capacidades de adsorción competitivas hasta 201.7 mg/g, bajo costo de producción y contribución a la economía circular. Adicionalmente, la incorporación de grupos funcionales y nanopartículas magnéticas ha permitido mejorar tanto la afinidad por los contaminantes como la facilidad de recuperación, aspectos clave para su implementación a escala industrial. No obstante, su aplicabilidad en el contexto colombiano aún es limitada, debido a la falta de estudios a escala piloto y condiciones reales de operación.

En cuanto a los desafíos y brechas identificadas, se determinó que la principal limitación para la implementación de estos materiales radica en la transición de estudios en laboratorio a sistemas continuos industriales. La mayoría de las investigaciones se desarrollan en condiciones batch, lo que dificulta la extrapolación de resultados. Además, factores como la variabilidad del pH, la presencia de iones competidores que pueden reducir la eficiencia hasta en un 50% y los costos asociados al ajuste químico del efluente representan barreras importantes. A esto se suma la limitada evaluación de la regeneración a largo plazo y la estabilidad estructural de los adsorbentes en múltiples ciclos.

En síntesis, aunque los aluminosilicatos funcionalizados presentan los mayores niveles de eficiencia, las zeolitas sintéticas obtenidas a partir de residuos industriales se perfilan como la alternativa más equilibrada para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales textiles en Colombia. Su implementación futura requiere el desarrollo de estudios a escala piloto, la evaluación en condiciones reales de operación y la integración con sistemas de tratamiento existentes, con el fin de garantizar su viabilidad técnica, económica y ambiental.

Referencias bibliográficas

Aloulou, H., Aloulou, W., & Amar, R. B. (2023). Desalinización y Tratamiento de Aguas.

Alsharief, H. H., Alatawi, N. M., Al-Bonayan, A. M., Alrefae, S. H., Saad, F. A., El-Desouky, M., & El-Bindary, A. A. (2023). Adsorption of Azorubine E122 via Na-mordenite with tryptophan composite. *Environmental Technology*, 45(17), 3496–3515.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2219399>

Alsharief, H. H., Alatawi, N. M., Al-bonayan, A. M., Alrefae, S. H., Saad, F. A., El-Desouky, M. G., & El-Bindary, A. A. (2023). *Environmental Technology*.

Alswieleh, A. M. (2023). Remediation of cationic and anionic dyes from water by histidine modified mesoporous silica. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(5), 1140–1152. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1873308>

Altintig, E., Alsancak, A., Karaca, H., Angin, D., & Altundag, H. (2022). Comparison of natural and magnetically modified zeolites in methyl violet removal. *Chemical Engineering Communications*, 209(4), 555–569.

Ameri, A., Faramarzi, M. A., Tarighi, S., Shakibaie, M., Ameri, A., Ramezani-Sarbandi, A., & Forootanfar, H. (2023). *Investigación y Diseño en Ingeniería Química*.

Arjomandi-Behzad, L., Rofouei, M. K., Badiei, A., & Ghasemi, J. B. (2022). *Revista Internacional de Química Analítica Ambiental*.

Ay, Ç., & Sarpaşar, Z. (2023). Removal of Reactive Red 120 using zeolite and Fe₃O₄@zeolite composites. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 44(2), 370–381.

Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1–3), 219–243.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7)

Baig, M. T., & Kayan, A. (2023). *Separación Ciencia y Tecnología*.

Belachew, N., & Hinsene, H. (2021). Natural clays and adsorption performance. *Silicon*.

Belachew, N., & Hinsene, H. (2021). *Silicon*.

Boudraa, R., Talantikite-Touati, D., Souici, A., Djermoune, A., Saidani, A., Fendi, K., Amrane, A., Bollinger, J.-C., Nguyen Tran, H., Hadadi, A., & Mouni, L. (2023). *Revista de Fotoquímica y Fotobiología A: Química*.

Bougdour, N., El Hayaoui, W., Tajat, N., Bakas, I., & Assabbane, A. (2024). *Progreso en Ciencias de la Ingeniería*.

Chung, K. T. (2016). Azo dyes and human health: A review. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 34(4), 233–261. <https://doi.org/10.1080/10590501.2016.1236602>

Das, M., Dasgupta, S., Klunk, M. A., Juceli Siqueira, S. X., Chemale Junior, F., & Wander, P. R. (2020). *Revista Canadiense de Química*.

Demirtas, E. A., Açikel, Y. S., & Aşçı, Y. (2025). *Ingeniería y Procesamiento Químico - Intensificación de Procesos*.

Dogar, S., Nayab, S., Farooq, M. Q., Said, A., Kamran, R., Duran, H., & Yameen, B. (2020). *ACS Omega*.

Doğaroğlu, Z. G., Uysal, Y., Demir, A., Makas, M. N., & Çaylalı, Z. (2023). *Química y Física de Materiales*.

Ebrahimpour, M., Hassaninejad-Darzi, S. K., & Zavvar Mousavi, H. (2022). *Revista Internacional de Química Analítica Ambiental*.

El Gaayda, J., Akbour, R. A., Titchou, F. E., Afanga, H., Zazou, H., Swanson, C., & Hamdani, M. (2021). *Aguas subterráneas para el desarrollo sostenible*.

Ellen MacArthur Foundation, A New Textiles Economy: Redesigning Fashion's Future. [En línea]. Disponible en: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>. [Accedido: 10-dic-2024].

El-Naggar, M. E., Wassel, A. R., & Shoueir, K. (2020). *Nanotecnología, Monitoreo y Gestión Ambiental*.

Esvandi, Z., Foroutan, R., Peighamardoust, S. J., Akbari, A., & Ramavandi, B. (2020). *Superficies e interfaces*.

Feze Fanle, T., Teikam Kenda, G., Tchuifon Tchuifon, D. R., Fotsop, C. G., Gabou Fogang, S., Kouam Tchummegne, I., & Kede, M. C. (2024). *Revista Internacional de Química Analítica Ambiental*.

Findik, S. (2023). *Arabian Journal for Science and Engineering*.

Forgacs, E., Cserháti, T., & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: A review. *Environment International*, 30(7), 953–971. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.001>

G. Ravindiran, H. Sundaram, y E. M. Rajendran, "Removal of Azo Dyes from Synthetic Wastewater Using Biochar Derived from Sewage Sludge," *Urban Climate*, vol. 49, art. 101502, may. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101502>.

Gebre Meskel, A., et al. (2024). Zeolite 4A adsorption performance. *Environmental Challenges*.

Gebre Meskel, A., Kwikima, M. M., Meshesha, B. T., Habtu, N. G., Naik, S. V. C. S., & Vellanki, B. P. (2024). *Desafíos Ambientales*.

Ghanavati, L., Hekmati, A. H., Rashidi, A., & Shafiekhani, A. (2021). PA-6/zeolite nanofiber adsorbents. *Journal of the Textile Institute*.

Güneş, K. (2023). *Desalinización y Tratamiento de Aguas*.

Guo, Q., Wu, L., Qi, G., & Liu, Y. (2020). *Desalinización y Tratamiento de Agua*.

Hamd, A., Shaban, M., AlMohamadi, H., Dryaz, A. R., Ahmed, S. A., Abu Al-Ola, K. A., & Abd El-Mageed, H. R. (2022). *ACS Omega*.

Harja, M., Buema, G., & Bucur, D. (2022). *Scientific Reports*.

Hashemi, H., Bahrami, S., Emadi, Z., Shariatipor, H., & Nozari, M. (2021). *Desalinización y Tratamiento de Agua*.

Holkar, C. R., Jadhav, A. J., Pinjari, D. V., Mahamuni, N. M., & Pandit, A. B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments. *Journal of Environmental Management*, 182, 351–366.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>

Hongo, T., Moriura, M., Hatada, Y., & Abiko, H. (2021). *ACS Omega*.

Identifican a otra empresa de textiles que está tiñendo el río Medellín, El Colombiano. [En línea].
Disponible en: <https://www.elcolombiano.com/medio-ambiente/identifican-a-otra-empresa-de-textiles-que-esta-tinendo-el-rio-medellin-IE4363659>. [Accedido: 10-dic-2024].

Ikhtlaq, A., Raashid, M., Akram, A., Kazmi, M., & Farman, S. (2021). *Desalinización y Tratamiento de Agua*.

J. J. Yepes-Nuñez, G. Urrútia, M. Romero-García y S. Alonso-Fernández, “Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas”, *Rev. Espanola Cardiol.*,

vol. 74, n.º 9, pp. 790–799, septiembre de 2021. Accedido el 11 de octubre de 2024. [En línea].

Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

Jamhour, R. M. A. Q., Al-Msiedeen, A., Al-Bashabsheh, M., Hani, H., & Jamhour, M. R. (2023).

Desalinización y Tratamiento de Aguas.

Jazi, H., Ezzahi, A., Karim, A., Idrissi, D. M., Bouhria, M., & Younssi, S. A. (2022). Sintering effect on

cationic and anionic dyes removal capacity of natural and sintered red clay. *Desalinización y*

Tratamiento de Agua, 290, 76-88. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.29020>

Jiang, T., Zhang, L., & Wang, H. (2019). Sustainable use of aluminosilicate minerals for wastewater

treatment. *Materials Science and Engineering*, 45(2), 98–112.

Kanani-Jazi, M. H., & Akbari, S. (2021). *Revista de Ingeniería Química Ambiental.*

Kangmenna, A., Acquah, S., Forkuo, R. B., Adusei, J. K., Atongo, G. A., Amarh, F. A., Opoku, F., &

Agorku, E. S. (2024). *Revista de Ciencia y Tecnología de la Dispersión.*

Kausar, A., Shahzad, R., Asim, S., BiBi, S., Iqbal, J., Muhammad, N., Sillanpaa, M., & Din, I. U. (2021).

Experimental and theoretical studies of Rhodamine B direct dye sorption onto clay-cellulose

composite. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 115165.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115165>

Kausar, A., Shahzad, R., Iqbal, J., Muhammad, N., Ibrahim, S. M., & Iqbal, M. (2020). *Revista*

Internacional de Macromoléculas Biológicas.

Kazemi, J., & Javanbakht, V. (2020). *Revista Internacional de Macromoléculas Biológicas.*

Khatibi, A. D., Yilmaz, M., Mahvi, A. H., Balarak, D., & Salehi, S. (2022). *Desalinización y Tratamiento*

de Aguas.

Khudhur, R. H., Ali, N. S., Khader, E. H., Abbood, N. S., Salih, I. K., & Albayati, T. M. (2023).

Desalinización y Tratamiento de Agua.

Kobyra, M., Dolaz, M., & Goren, A. Y. (2024). *Revista de Cromatografía A.*

Loqman, A., El Bali, B., El Gaidoumi, A., Boularbah, A., Kherbeche, A., & Lützenkirchen, J. (2021).

Silicon.

Loutfi, M., Mariouch, R., Mariouch, I., Belfaquir, M., & ElYoubi, M. S. (2025). *Revista del Instituto de*

Ingenieros Químicos de Taiwán.

Manzoor, A., Elboughdiri, N., Zafar, S., Khan, M. I., Manzoor, S., Suleman, J., Zafar, A. M., Aslam, S.,

Rajput, R., Shanableh, A., Shuja, R., Ahmad, F., & Shahida, S. (2023). *Desalinización y Tratamiento de Aguas.*

Medri, V., Papa, E., Mor, M., Vaccari, A., & Landi, E. (2020). Geopolymer-based materials for adsorption.

Applied Clay Science.

Mirilă, D.-C., Boudissa, F., Beltrao-Nuñez, A.-P., Platon, N., Didi, M.-A., Nistor, I.-D., Roy, R., & Azzouz,

A. (2020). *Ozone: Science & Engineering.*

Miyah, Y., Benjelloun, M., Lahrichi, A., Mejbar, F., Iaich, S., El Mouhri, G., Kachkoul, R., & Zerrouq, F.

(2021). *Revista de Ingeniería Química Ambiental.*

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). The PRISMA statement. *Journal of Clinical*

Epidemiology, 62(10), 1006–1012.

Moradi, M., Hosseini Sabzevari, M., Marahel, F., & Shameli, A. (2023). *International Journal of*

Environmental Analytical Chemistry.

- Naghipour, D., Taghavi, K., Hasanzadeh, D., Ashrafi, S. D., & Moslemzadeh, M. (2023). *Desalinización y Tratamiento de Agua*.
- Narimani, M., Gonbadi, M., & Zerafat, M. M. (2024). Methylene blue adsorption on Y-zeolite. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–21.
- Nefzi, H., Tahari, N., Bachrouch, O., Abderrabbaa, M., & Labidi, J. (2023). *Desalinización y tratamiento de aguas*.
- Oviedo, L. R., Oviedo, V. R., Dalla Nora, L. D., & da Silva, W. L. (2023). *Tecnología de separación y purificación*.
- Page, M. J., et al. (2021). PRISMA 2020 guideline. *Systematic Reviews*, 10(1).
- Patil, Y., Attarde, S., Fegade, U., Bakather, O. Y., & Ali, S. K. (2023). Highly efficient removal of a toxic methylene blue dye by adsorption on CuAlMnO nanoparticles: adsorption kinetics, isotherm, and mechanism studies using statistical modelling. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2287689>
- Pereira, L., Alves, M., & Lopes, A. (2019). Toxicity of textile effluents on aquatic life. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 306–315.
- Peyghami, A., Moharrami, A., Rashtbari, Y., Afshin, S., Vosuoghi, M., & Dargahi, A. (2023). *Revista de Ciencia y Tecnología de la Dispersión*.
- Pormazar, S. M., & Dalvand, A. (2020). *Korean Journal of Chemical Engineering*.
- Portafolio, "Industria textil, una de las más contaminantes, quiere ser sostenible," Portafolio.co. [En línea]. Disponible en: <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/industria-textil-una-de-las-mas-contaminantes-quiere-ser-sostenible-525646>. [Accedido: 10-dic-2024].

- Pournamdari, E., Niknam, L., Davoudi, S., & Khazali, F. (2024). *Revista Internacional de Fitorremediación*.
- Ramteke, P. K., Rathod, A. P., Kodape, S. M., & Sonawane, S. S. (2024). *Chemical Papers*.
- Rashid, T., Iqbal, D., Hazafa, A., Hussain, S., Sher, F., & Sher, F. (2020). *Revista de Ingeniería Química Ambiental*.
- Razm, A. H., Salem, A., & Salem, S. (2022). *Journal of Hazardous Materials*.
- Rharib, M. E., Goulhay, L., Slek, Y., Elghachtouli, S., Azzi, M., & Zaroual, Z. (2024). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*.
- Ristić, M., Samaržija-Jovanović, S., Jovanović, T., Jovanović, V., Kostić, M., Marković, G., & Marinović-Cincović, M. (2024). *Revista de Ingeniería Química Ambiental*.
- Ritter, M. T., Lobo-Recio, M. A., Padilla, I., Nagel-Hassemer, M. E., Romero, M., & López-Delgado, A. (2024). *Revista de Química Industrial y de Ingeniería*.
- Sadaqat, M., Kausar, A., Iqbal, M., Alzahrani, F. M., Abbas, M., Mnif, W., & Nazir, A. (2025). *Desalinización y Tratamiento de Agua*.
- Sahraoui, N., Aguedal, H., Djafer, L., Djafer, A., Driouch, A., Maimoun, B., Singh, V., & Elaiassaoui Elmeliiani, M. E. A. (2025). Competitive adsorption of Evans Blue and Congo Red dyes onto natural Marl Clay: an insight of co-adsorption isotherm models. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/03067319.2025.2468771>
- Slokar, Y. M., & Le Marechal, A. M. (1998). Methods of decoloration of textile wastewaters. *Dyes and Pigments*, 37(4), 335–356. [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(97\)00075-2](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(97)00075-2)

Stiborová, M., Martínek, V., Rýdlová, H., Hodek, P., & Frei, E. (2002). Metabolism of the carcinogenic azo dye Sudan I. *Cancer Research*, 62(20), 5678–5684.

Stiborová, M., Martínek, V., Rýdlová, H., Hodek, P., & Frei, E. (2002). Metabolism of the carcinogenic azo dye Sudan I by rat and human liver microsomes. *Cancer Research*, 62(20), 5678-5684.

Tony, M. A. (2022). Low-cost adsorbents for environmental pollution control. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 43(11), 1612–1633.

Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, "Determinación del potencial de micorremediación en tintes azoicos empleando el hongo de la podredumbre blanca," Colmayor.edu.co. [En línea]. Disponible en: <https://www.colmayor.edu.co/wp-content/uploads/2023/12/3.30.-Determinacio%CC%81n-del-potencial-de-micorremediacio%CC%81n-en-tintes-azoicos-empleando-el-hongo-de-la-podredumbre-blanca.pdf>. [Accedido: 10-dic-2024].

Wang, S., & Peng, Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>

Y. Zhang, L. Zhao, y J. Zhang, "Aluminosilicates as Cost-Effective Adsorbents for Dye Removal," *Applied Clay Science*, vol. 208, art. 106021, ene. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106021>.

Zari, R., El Faroudi, L., El Hadrami, A., Monkade, M., Abdelouahdi, K., Laghzizil, A., Nunzi, J. M., & Brahmi, R. (2024). Development of a selective Na-zeolite X from Moroccan coal fly ash for anionic dye adsorption. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(20), 9597–9615.