

## Revisión sistemática del proceso de teñido de algodón con colorantes reactivos para optimizar la cinética tintórea en fase de adsorción

<http://doi.org/10.53358/ideas.v6i2.963>

**Omar Godoy-C**

Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador

[ovgodoy@utn.edu.ec](mailto:ovgodoy@utn.edu.ec)

*Fecha de envío, octubre 12/2023 - Fecha de aceptación, junio 6/2024 - Fecha de publicación, julio 15/2024*

**Resumen:** La fase de adsorción y la cinética tintórea como elementos correlacionados en un proceso de teñido con colorantes reactivos sobre fibra de algodón son de vital importancia, no solo para el proceso tintóreo como tal, sino que además, un adecuado y consciente uso de los elementos que intervienen en la receta de tintura, la curva de procesos ajustada a las realidades del equipo, maquinaria y procesos, así como una adecuada elección de los colorantes y auxiliares, permitirá tener el mayor aprovechamiento del color sobre la fibra. Es por esto que, tras la revisión sistemática de literatura, varios autores abordan estas dos temáticas como elementos fundamentales para ser revisados en un proceso, mismos que aportan en la reducción del tiempo de teñido, la correcta igualación del color sobre la fibra y por sobre todo, permiten tener el mayor aprovechamiento de colorantes y auxiliares, y con ello minimizar la cantidad de desperdicios; y, posteriormente, realizar procesos de recuperación de agua más eficientes, ecológicos y naturales.

**Palabras clave:** textiles, colorantes, proceso de teñido, fase de adsorción.

**Abstract:** The adsorption phase and dyeing kinetics as correlated elements in a dyeing process with reactive dyes on cotton fiber are of vital importance, not only for the dyeing process itself but also because an appropriate and conscious use of the elements involved in the dyeing recipe, the process curve adjusted to the realities of the equipment, machinery, and processes, as well as an adequate choice of dyes and auxiliaries, will allow for the maximum utilization of color on the fiber. This is why, after a systematic literature review, various authors address these two themes as fundamental elements to be reviewed in a process. These elements contribute to reducing dyeing time, achieving correct color uniformity on the fiber, and most importantly, maximizing the use of dyes and auxiliaries, thereby minimizing waste. Additionally, this enables the implementation of more efficient, ecological, and natural water recovery processes.

**Keywords:** textiles, dyes, dyeing process, adsorption phase.

*Autor de correspondencia:*

Omar Godoy, [ovgodoy@utn.edu.ec](mailto:ovgodoy@utn.edu.ec)



## Introducción

La tintura de algodón con colorantes reactivos es ampliamente utilizada en la industria textil debido a su capacidad para lograr colores brillantes y duraderos en las fibras de algodón, pero en muchas ocasiones, la decoloración es un proceso inevitable, es decir el rompimiento de la unión colorante-fibra, afinidad colorante-fibra, calidad de la radiación, temperatura-humedad, cinética tintórea, entre otras [1][2]. La optimización de este proceso es esencial para garantizar la eficiencia y la calidad del teñido. Entre las etapas fundamentales, la fase de adsorción juega un papel crucial [3][4][5].

La adsorción se refiere al proceso mediante el cual, los colorantes reactivos se unen químicamente a las fibras de algodón, formando enlaces estables y permanentes. Esta etapa determina la cantidad de colorante que se adhiere a las fibras y, por lo tanto, la intensidad y la solidez del color obtenido [4][6]. Desafortunadamente, para el proceso de teñido se hace necesaria la utilización de grandes cantidades de sal y álcalis, mismas que se convierten en una problemática ambiental, pues su reutilización hasta la fecha sigue siendo una tarea pendiente [7][8]. Una característica adicional a tomar en cuenta, es el tipo de colorante y la fibra a ser teñida; en este sentido, el colorante reactivo presenta un 72% de absorción de colorante en relación con el 98% del colorante directo [9][10].

En tal virtud, la exploración de la literatura científica reciente, relacionada con el teñido de algodón con colorantes reactivos, permite analizar las investigaciones sobre la cinética tintórea y su relación con la fase de adsorción.

En este estudio, se explora la importancia de la fase de adsorción en la optimización del proceso de tintura de algodón con colorantes reactivos. Además, se examinan las estrategias y técnicas utilizadas para mejorar la adsorción [11][8][12], como el uso de agentes de dispersión y la modificación química de las fibras, además de comprender la optimización de la fase de adsorción con el fin de mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de teñido.

Al hacer un análisis de los elementos que intervienen en el proceso de tintura, se llega a establecer que las condiciones óptimas del proceso se ven influenciadas por la concentración de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , la concentración de colorante, el tiempo de inmersión, el número de inmersiones y pinzamientos y el tiempo de vaporización en la fijación del colorante y el valor K/S del algodón teñido [13][14][15].

## Relación entre fase de adsorción y la cinética tintórea

El teñido de fibras textiles en condiciones acuosas es el método más utilizado en la actualidad a nivel mundial [16][17][8]. Esto se da gracias a los enlaces covalentes generalmente formados, inclusive mayor a la de los puentes de hidrógenos y las fuerzas de Van der Waals, haciendo que los colorantes reactivos, presenten una elevada solidez del color a diferentes pruebas de calidad [18][19]. El color, son simplemente ondas de luz que viajan a través del espacio y dependiendo de la cantidad de nanómetros, para que estos sean visibles o no al ojo humano, según el rango de espectro visible comprendido entre los 450nm y 750nm [20][21], los colorantes reactivos son muy efectivos en el teñido de telas, sin embargo, una elección no apropiada de parámetros y componentes puede ocasionar resultados adversos con respecto al teñido de sustratos textiles [22][23].

Los colorantes reactivos bifuncionales, presentan un grado de agotamiento relativamente corto y esto se debe a la fase determinante de adsorción, es decir, la cantidad de colorante que se deposita de forma superficial sobre la fibra y que ha salido con rumbo al sustrato a teñirse, desde el baño de tintura [24].

## **Objetivos**

Como base de la investigación y su posterior desarrollo, se formulan las siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles son los factores clave que influyen en la eficiencia de la fase de adsorción en el proceso de teñido de algodón con colorantes reactivos?
- ¿Qué técnicas son utilizadas para medir la cinética tintórea en fase de adsorción?
- ¿Qué tipos de colorantes reactivos se utilizan para optimizar la cinética tintórea en fase de adsorción y cómo determinar y comparar su eficiencia?

En este sentido, se plantea el siguiente objetivo: Determinar cómo la fase de adsorción en el teñido con colorantes reactivos incide en la optimización del proceso.

## **Metodología**

El proceso de revisión sistemática de literatura intenta encontrar una relación entre la fase de adsorción y la optimización de proceso de teñido de algodón con colorantes reactivos, para lo cual, se detalla el siguiente esquema de trabajo [11]:

- Formulación de las preguntas de investigación.
- Búsqueda de la información: Identificación y cribado de los elementos para análisis.
- Determinación de categorías: clasificación y tamaño de la información.
- Evaluación del material recolectado: Definición de categorías y dimensionamiento para obtener resultados de las investigaciones.

Para una mejor comprensión del proceso de revisión sistemática se detalla en la Figura 1.

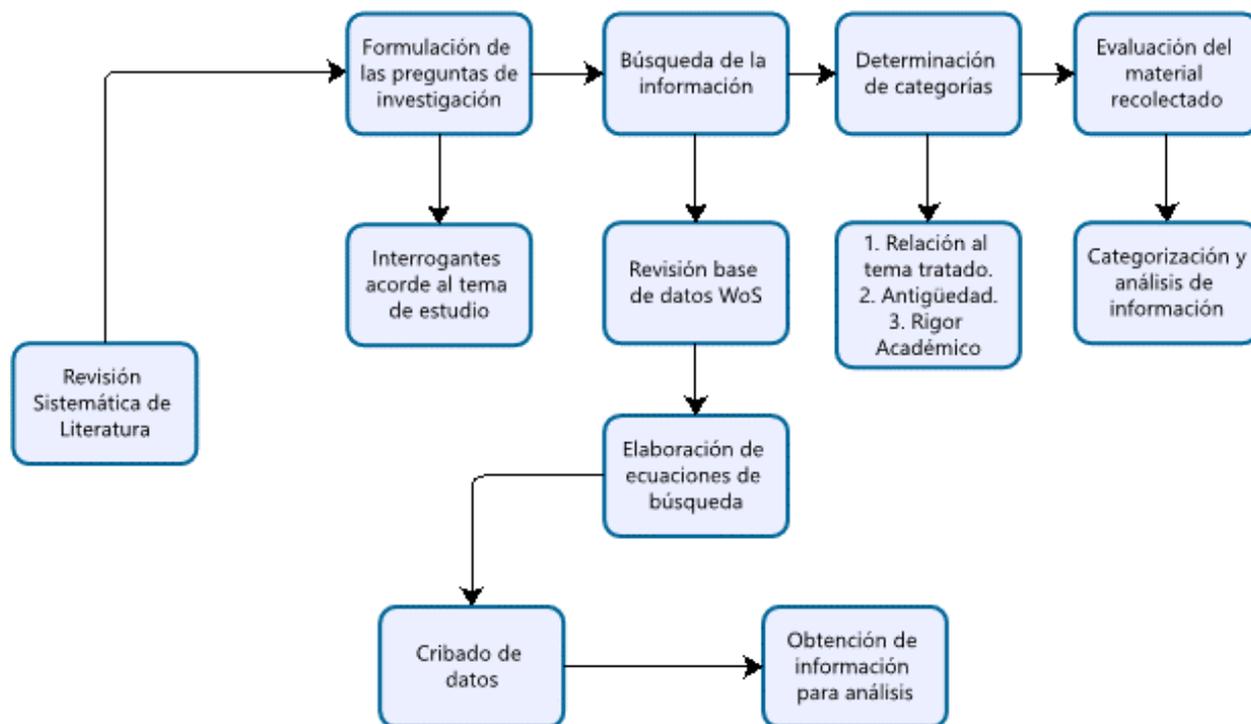


Fig. 1. Proceso de Revisión sistemática.

### Clasificación de la información.

Para esta parte del proceso investigativo, se recurre al análisis de documentos almacenados en la base de datos Web of Science (WoS) sean artículos de revista o publicaciones comprendidas entre 2019 a 2023, en idioma inglés; previo a ello, se realizó un análisis de las posibles interconexiones entre diferentes terminologías, haciendo uso del software VOSVIEWER (Ver Figura 2), considerando criterios de búsqueda que giran en torno a: teñido con colorantes reactivos, fase de adsorción, cinética tintórea, procesos de tintura, optimización, ingeniería textil y fibras celulósicas. Es indispensable aclarar, que la revisión sistemática maneja criterios como: a. relación con el tema tratado, b. Originalidad, c. Rigor académico, d. Antigüedad de las publicaciones, e. Acceso libre a la información, f. Metodología y confiabilidad de la información.

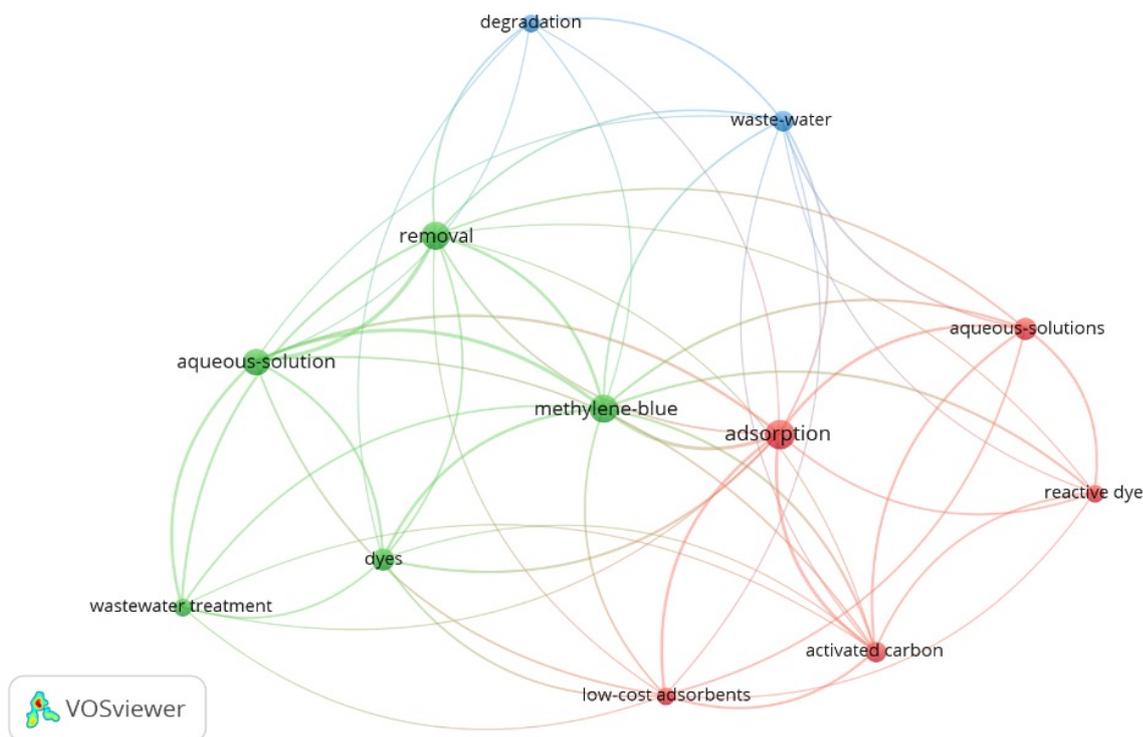


Fig. 2. Relación entre terminología afin al tema tratado

La base de datos Web of Science permite tener acceso a documentación valiosa para la aplicación del modelo PRISMA para revisiones sistemáticas (Ver Figura 3). En este sentido, para analizar los factores de adsorción se utilizó el siguiente criterio de búsqueda sobre la lista de artículos:

- Ecuación de búsqueda 1: ("Cotton dyeing" or "reactive dyes") AND ("reactive dyes" or "adsorption kinetics" or "adsorption factors")
- Ecuación de búsqueda 2: ("Cotton dyeing" OR "reactive dyes") AND (("spectroscopy" OR "chromatography" OR "colorimetry" OR "HPLC") OR ("UV-Vis" OR "FTIR" OR "NMR") OR "measurement techniques")
- Ecuación de búsqueda 3: ("Cotton dyeing" OR ("reactive dyes" OR "dye types")) AND ("adsorption kinetics" OR "adsorption efficiency")

Como criterios de inclusión, se tomaron en cuenta estudios experimentales y teóricos que investiguen la cinética de adsorción en el teñido de algodón de colorantes reactivos, que analicen uno o más factores que puedan influir en la eficiencia de adsorción, como la temperatura, el pH, la concentración de colorantes, tiempo de procesamiento, entre otros [7][25]. También se revisaron aquellos estudios que utilicen únicamente colorantes reactivos para teñidos de algodón, y, se excluyeron aquellos trabajos que no cumplieron con estos requisitos de inclusión; de igual manera, aquellas investigaciones que no proporcionaron suficiente información sobre su metodología o presentaron limitaciones significativas en el interés de este artículo, fueron descartadas.

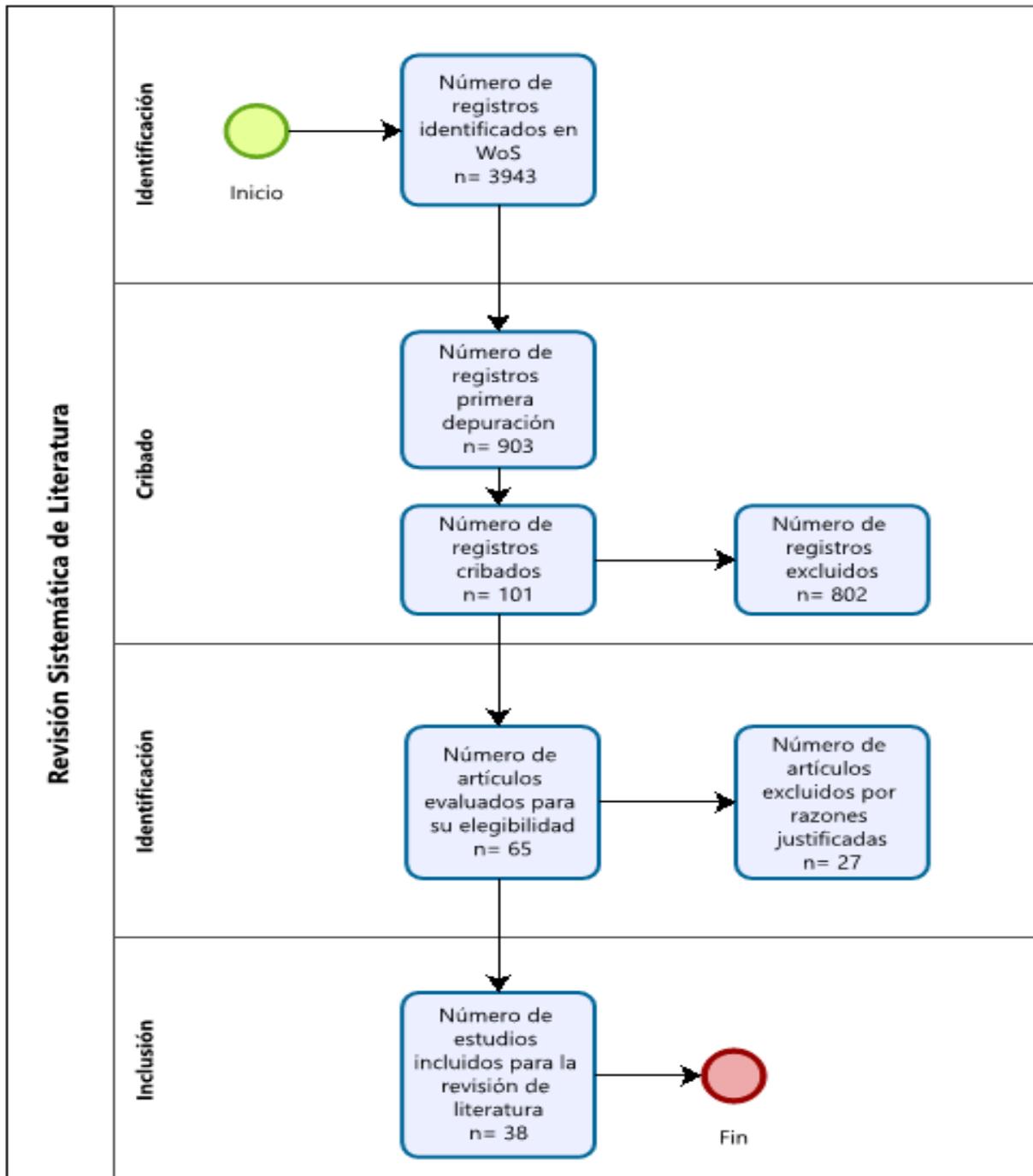


Fig. 3. Modelo Prisma para artículo de revisión sistemática [26]

En esta parte del proceso investigativo, se elabora la estructura del documento como tal, para tal fin se define que en la parte introductoria, se deben incluir elementos y conceptualizaciones asociadas al proceso de teñido con colorantes reactivos, de manera especial en el manejo de fibras celulósicas; acto seguido, se relaciona bibliografía obtenida, se definen los elementos primarios que intervienen en el proceso de teñido, su incidencia en la fase de adsorción, y la interconexión en la optimización del proceso.

## Análisis descriptivo

### Selección de estudios

Los 38 estudios incluidos para esta revisión sistemática, fueron evaluados para ser elegidos, acorde a criterios preestablecidos en el apartado 4.1, pudiendo explicarse que se excluyen a todos aquellos elementos que principalmente no cumplen con los siguientes parámetros: no sean artículos OPEN ACCES, sean publicados antes del 2019, correspondan a CPAPER, JOURNAL y PAPER, además, que guarden relación con los términos de búsqueda (algodón, colorantes reactivos, cinética tintórea, fase de adsorción, proceso de teñido). La Figura 4 muestra el resultado de esta clasificación.

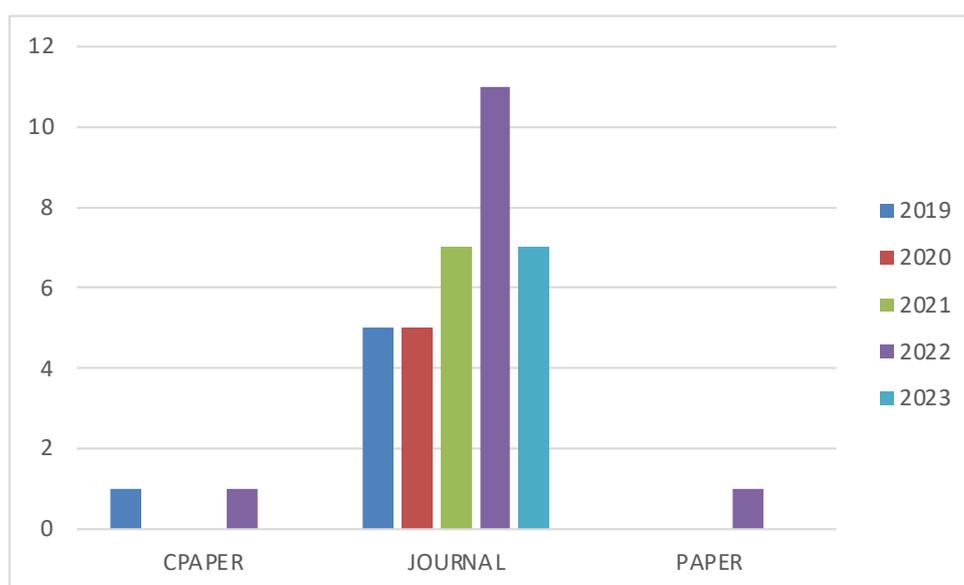


Fig. 4. Número de publicaciones por año

En este sentido, se logra establecer que la revista con más número de publicaciones que almacena en sus repositorios, corresponde a "Moléculas y Materiales", cada una con tres publicaciones; seguidamente, las revistas con 2 publicaciones en sus bases de datos son: 2nd Forum In Research; Science And Technology; Biointerface Research In Applied Chemistry; Coatings; Journal Of Engineered Fibers And Fabrics; Journal Of Molecular Liquids; Rsc Advances; Sustainability; y, finalmente, los repositorios científicos indexados con una publicación por cada una son: 2nd Forum In Research, Science, And Technology; ACS Omega; cellulose; Ecological Chemistry And Engineering S-Chemia I Inzynieria Ekologiczna S; Egyptian Journal Of Chemistry; Environment Protection Engineering; Environmental Science And Pollution Research; Fibers; International Journal Of Biomaterials; International Journal Of Environmental Analytical Chemistry; Journal Of Chemistry; Journal Of Environmental Chemical Engineering; Journal Of Materials Research And Technology-Jmr&T; Materials To-day-Proceedings; Microbiology-SGM; Separations; Third International Conference On Energy Engineering And Environmental Protection y Water Science And Technology (ver Figura 5).

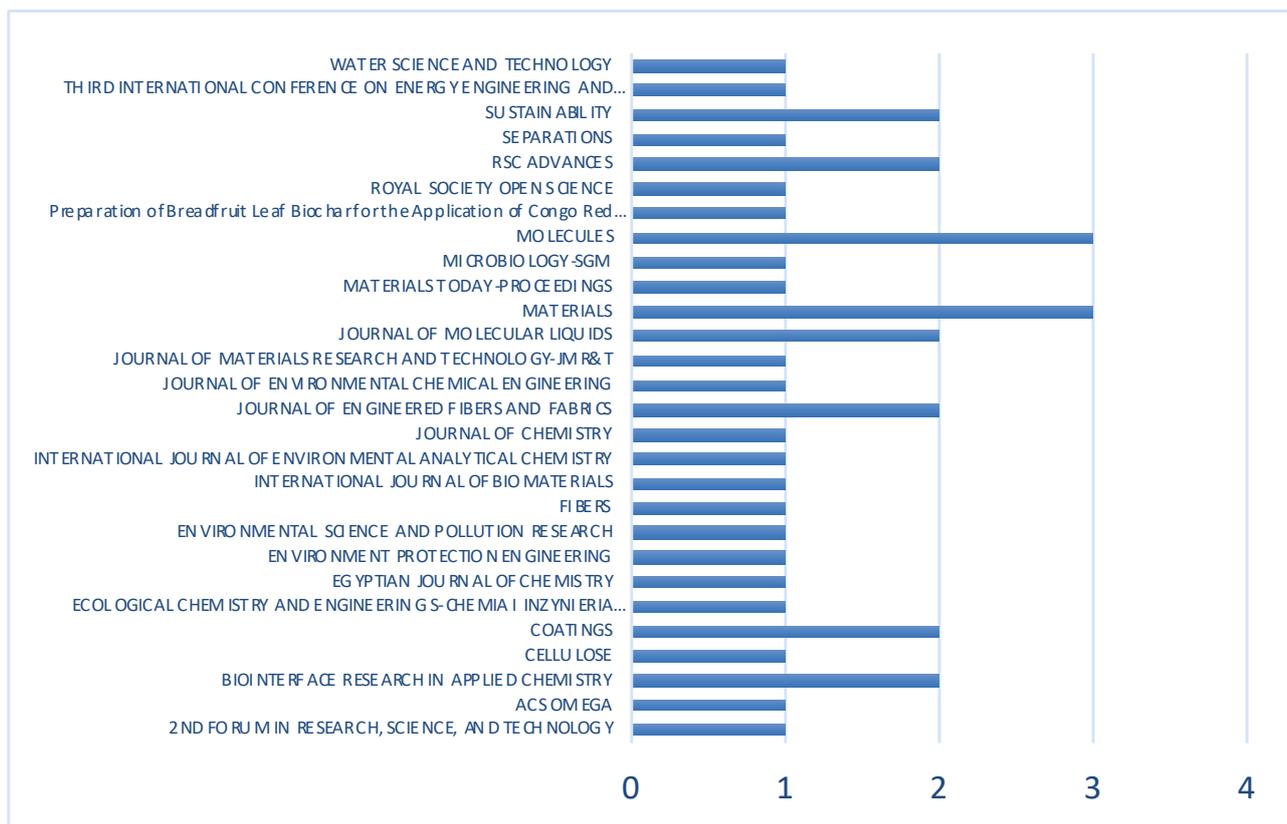


Fig. 5. Repositorios de publicaciones

### Características de los estudios

Los 38 estudios elegidos tienen una relación con el tema tratado, y, además, son publicaciones catalogadas como CPAPER con un número total 2 publicaciones, 35 publicaciones catalogadas como JOURNAL y, 1 publicación catalogada como PAPER dentro de WoS. Esta clasificación se muestra en la Figura 6.

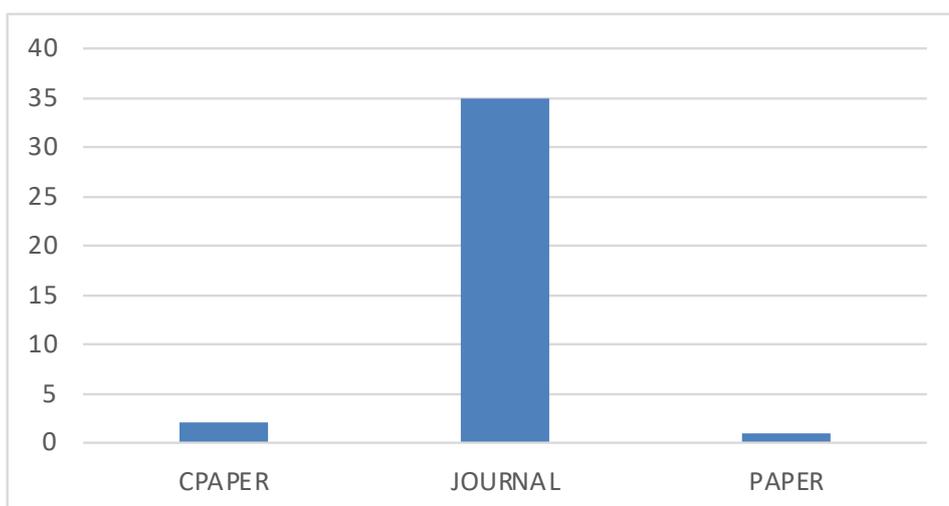


Fig. 6. Características de los estudios

## Ubicación geográfica

De acuerdo con los datos analizados (ver Figura 7), se resume que el país con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema es Inglaterra con 14 publicaciones, seguido de Suiza con 12 publicaciones, a continuación, los Países Bajos con 5 publicaciones, Polonia y Rumania cada una con 2 publicaciones y Egipto, Alemania y Estados Unidos con 1 publicación por país.

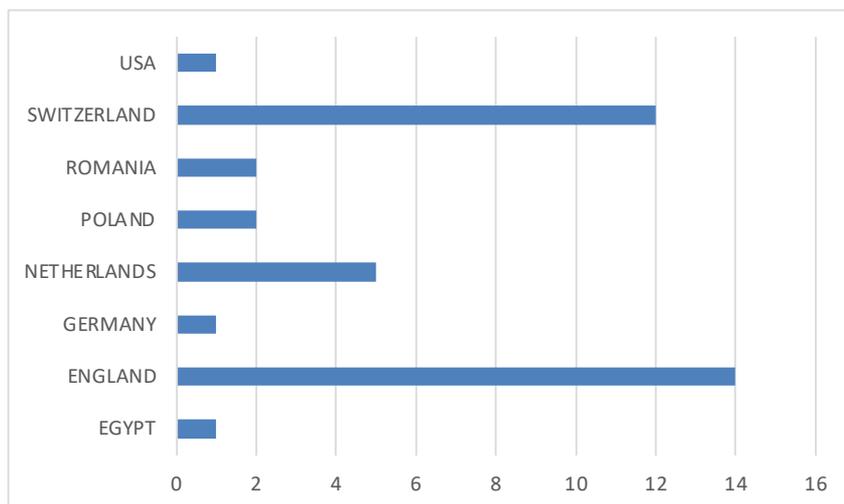


Fig. 7. Número de publicaciones por país

En esta sección, se pretende analizar la información recolectada y segmentarla en dos grupos bien definidos: Adsorción y Cinética tintórea.

Para tal fin, se logran encontrar 27 artículos que abordan la importancia de la fase de adsorción en los procesos tintóreos, tanto en el teñido como tal, así como en la importancia que la adición de sales y álcalis mantiene con el tratamiento de aguas residuales.

Acto seguido, se identifican 11 estudios en los cuales se aborda la temática relacionada con la cinética tintórea (ver Figura 8).

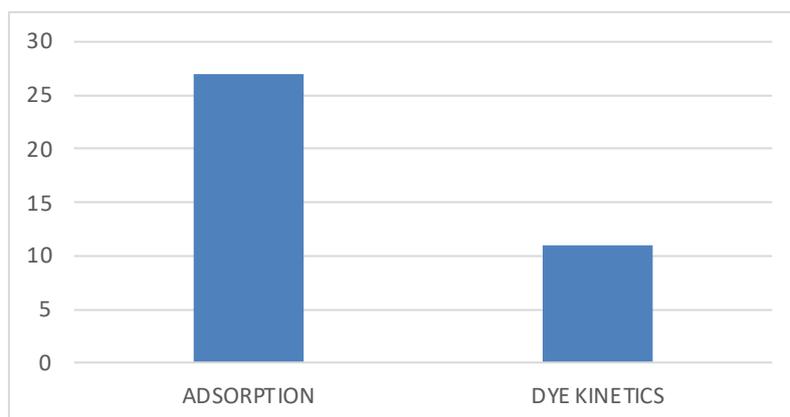


Fig. 8. Categorización

De la información recolectada se han podido establecer una serie de definiciones que sirven de soporte para determinar la relación entre la cinética tintórea y la efectividad del proceso de teñido. En la Tabla 1, se detallan los hallazgos.

Tabla 1. Definiciones Fase de adsorción-Cinética tintórea según algunos autores

Autor	Descripción
Kevin Beng Kieng Lau	Las características que tenga el adsorbente en términos físicos, permite retener una mayor cantidad de tinte en función del área que este posea. [21].
Abu Naser Md Ahsanul Haque	El uso de colorante desencadena a una descarga cuantiosa de aguas residuales. Causante principal de la contaminación. En el mundo, el consumo de colorantes bordea las 700.000 Ton. En diferentes sectores industriales y de estas, entre el 10% al 15% se vierten directamente en forma de aguas residuales [19].
Saheed A. Popoola	Los materiales utilizados para adsorber el colorante azul básico y posterior medición de la eficiencia de la adsorción se realizó en concentraciones y con una cantidad máxima adsorbida de 346 mg/g, según lo estimado por el modelo de Langmuir se encontró que el proceso de adsorción era favorable y espontáneo [14].
Taufiq Rinda Alkas	En lo referente a la adsorción de colorantes, las capacidades de decoloración se vieron afectadas por varios factores, como la concentración del tinte, la temperatura, el pH y las condiciones estáticas o agitadas [23].
Sonatika Sonal	La adsorción es uno de los procesos de tratamiento más simples para la eliminación de colorantes en aguas residuales. Algunos investigadores han informado sobre el uso de carbón activado dopado con diferentes metales para la eliminación de diferentes clases de colorantes, pero su capacidad de adsorción los hace incompatibles [27].
Jiping Wang	El tiempo de equilibrio de adsorción del tinte reactivo es solo de 5-10 minutos a 25 °C, mientras que se necesita más tiempo a 60 °C en el sistema de teñido con agua. La tensión superficial del medio no acuoso influye en la velocidad de adsorción del tinte. Cuanto menor sea la tensión superficial, más rápida será la velocidad de adsorción del tinte reactivo y mayor será la absorción final del tinte. Como resultado, la tecnología de teñido no acuoso proporciona un enfoque innovador para aumentar la absorción de tintes a bajas temperaturas de teñido, además de lograr importantes ahorros de agua [28].
Stanislaw Prus	los tintes con carga negativa y las fibras con carga negativa experimentan una repulsión iónica, lo que dificulta el agotamiento. Para superar este problema, se agregan electrolitos (el más común es el sulfato de sodio) para ayudar en el proceso de agotamiento. Después del agotamiento, se lleva a cabo el paso de fijación mediante la adición de álcali. La formación de enlaces covalentes entre el tinte y la fibra solo puede ocurrir cuando el tinte se ha absorbido en la fase de celulosa [1].

## Discusión

La relación entre la "fase de adsorción, cinética tintórea y eficiencia del proceso, sustentada en los hallazgos de esta revisión sistemática, han permitido establecer una interconexión muy fuerte, siendo de gran relevancia, resaltar los siguientes aspectos:

Una óptima fase de adsorción, es aquella que permite el desplazamiento de las moléculas de colorantes desde el baño de tintura hacia la fibra, en este sentido, la cantidad de sal necesaria para el intercambio electrolítico es vital, la cantidad óptima de este producto, permitirá que exista una rápida reacción del colorante con la fibra y consecuentemente, la velocidad de teñido se acorte [29]; otro factor muy importante es el nivel de pH, este factor influye de manera drástica, especialmente cuando la fase de adsorción ha terminado

y la absorción comienza, es decir, el colorante pasará desde la superficie de la fibra hacia el interior de esta. Por otra parte, una elección adecuada de parámetros como tiempo de agotamiento, temperatura y gradientes, aportarán a que el proceso sea lo más eficiente posible, pues es en este punto, donde se permite que las moléculas de colorantes se desplacen desde el medio acuoso hacia la fibra y además, la elección adecuada del tipo de colorante y sus características, permitirán que las reacciones químicas se lleven a cabo en el momento ideal; la elección adecuada de colorante y una relación íntima entre las dosificaciones de auxiliares no solo son vitales, son imprescindibles.

Una de las técnicas mayormente empleadas para medir la cinética tintórea se la conoce como espectrofotometría, misma que consiste en la medición de la luz absorbida por el objeto bajo estudio en condiciones controladas, esta cantidad de luz, está dentro de los rangos visibles por el hombre, utilizando técnicas de medición espectral [13][5], pudiendo determinarse la cantidad de colorante retenido por la fibra en función de las comparaciones antes y después del teñido e inclusive, posterior a un proceso de calidad de tintura, tal como es el caso del ensayo AATCC 61 para determinar la solidez del color al lavado.

Al respecto de las limitaciones de este estudio se puede indicar que el acceso de la información, en determinadas instancias, ha llevado a encontrar varios puntos de inflexión que no se consideraron en las revisiones iniciales, por ejemplo, la gran cantidad de estudios que hacen alusión a la fase de adsorción no estrictamente a la fase de teñido, sino más bien al proceso de recuperación de las aguas residuales provenientes de la tintura de fibras de algodón con colorantes directos o con colorantes reactivos; esto ha planteado una serie de cuidados a llevarse a cabo, con el fin de no tener sesgos en los resultados.

Un colorante reactivo está conformado de al menos un grupo cromóforo compuesto por enlaces azoico ( $N=N$ ), y es el principal elemento para el otorgamiento del color en una tintura [30], además de que estos son la familia más grande de colorantes textiles a nivel mundial, teniendo como resultado ciertas características propias de este producto como: dificultad de degradación en condiciones naturales, dificultad de tratamiento de aguas por sistemas convencionales como: adsorción, filtración, coagulación y floculación, siendo varios de ellos, muy costosos [31].

La cantidad de colorante adsorbido expresado en nivel porcentual implica apenas el 50% en varios casos, es decir, gran cantidad de colorante, por efectos de una mala elección de auxiliares, máquinas y curva de calentamiento, ralentizan su efectividad, teniendo como resultado una cantidad de colorante que finalmente reacciona con el agua del proceso en vez de la tintura [32][33].

## Conclusiones

La parte medular de esta investigación gira en torno a encontrar una relación entre la fase de adsorción, la cinética tintórea y posterior eficiencia del proceso de teñido, el análisis de la documentación encontrada, da como resultado que la gran mayoría de estudios centran su atención en la fase de adsorción, por la implicación desde el punto de teñido y la posibilidad de recuperar las aguas residuales provenientes del teñido con colorantes reactivos, gracias al uso de la fase de adsorción como elemento principal para recolectar el colorante disuelto en el baño de tintura.

La gran mayoría de documentación analizada, da como puntos fuertes para que la fase de adsorción tenga los mejores resultados, a la elección de los productos auxiliares, mismos que deben compartir una carga iónica compatible para prevenir precipitaciones o comportamientos anómalos; además, la selección de los productos reguladores de pH son de suma importancia, pues de ello dependerá que la alcalinidad, establecida en un rango 10,5 a 11,5 permitan que el colorante se desplace del baño de tintura hacia la fibra en las mejores condiciones.

Finalmente, un buen proceso, elección adecuada de curvas de calentamiento de agua y gradientes de temperatura, permiten que la cinética tintórea se desarrolle con normalidad, haciendo que el colorante finalmente tras la fase de adsorción continúe la fase de migración y fijación, mismas que definirán el éxito, en términos de calidad.

## Agradecimientos

Cabe señalar que el proceso de revisión sistemática ha requerido de un gran esfuerzo, no solamente intelectual, sino que también ha requerido el financiamiento propio para la búsqueda, extracción y cribado de la documentación, es importante reconocer el apoyo de la Universidad Técnica del Norte al mantener el acceso abierto al personal a su servicio con la información sin mayores restricciones.

## References

1. Prús S, Kulpiński P, Matyjas-Zgondek E, et al (2023) The Light Fastness of the Reactive Dyes on Cationized Cellulose. *J Nat Fibers* 20:. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2215995>
2. Sales DA, Lima PNS, Silva LS, et al (2022) Amino-Functionalized Titanate Nanotubes: pH and Kinetic Study of a Promising Adsorbent for Acid Dye in Aqueous Solution. *Materials (Basel)* 15:. <https://doi.org/10.3390/ma15186393>
3. Farias S, De Oliveira D, Ulson De Souza AA, et al (2017) Removal of Reactive Blue 21 and Reactive Red 195 dyes using horseradish peroxidase as catalyst. *Brazilian J Chem Eng* 34:701–707. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20160091>
4. Djordjevic D, Stojiljkovic D, Smelcerovic M (2014) Adsorption kinetics of reactive dyes on ash from town heating plant. *Arch Environ Prot* 40:123–135. <https://doi.org/10.2478/aep-2014-0024>
5. Ngaha MCD, Njanja E, Doungmo G, et al (2019) Indigo Carmine and 2,6-Dichlorophenolindophenol Removal Using Cetyltrimethylammonium Bromide-Modified Palm Oil Fiber: Adsorption Isotherms and Mass Transfer Kinetics. *Int J Biomater* 2019:. <https://doi.org/10.1155/2019/6862825>
6. Balakrishnan S, Wickramasinghe GD, Wijayapala US (2019) Study on dyeing behavior of banana fiber with reactive dyes. *J Eng Fiber Fabr* 14:. <https://doi.org/10.1177/1558925019884478>
7. Liu L, Mu B, Li W, Yang Y (2019) Cost-effective reactive dyeing using spent cooking oil for minimal discharge of dyes and salts. *J Clean Prod* 227:1023–1034. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.277>

8. Al-Qahtani SD, Snari RM, Alamrani NA, et al (2022) Synthesis and adsorption properties of fibrous-like aerogel from acylhydrazone polyviologen: efficient removal of reactive dyes from wastewater. *J Mater Res Technol* 18:1822–1833. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.087>
9. Sökmen N, Aktas MO (2013) Dyeing of linen and blends with direct, reactive and sulphur dyes. *Asian J Chem* 25:3893–3896. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.13835>
10. Zhang J, Zhu M, Jones I, et al (2021) Performance of activated carbons prepared from spent tyres in the adsorption of rhodamine B in aqueous solutions. *Environ Sci Pollut Res* 28:52862–52872. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14502-4>
11. Cagnetti C, Gallo T, Silvestri C, Ruggieri A (2021) Lean production and Industry 4.0: Strategy/management or technique/implementation? A systematic literature review. *Procedia Comput Sci* 180:404–413. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.256>
12. Irdemez Ş, Özyay G, Ekmekyapar Torun F, et al (2022) Comparison of Bomaplex Blue CR-L Removal by Adsorption Using Raw and Activated Pumpkin Seed Shells. *Ecol Chem Eng S* 29:199–216. <https://doi.org/10.2478/eces-2022-0015>
13. Shan B, Xiong W, Zhang S (2019) Dyeing method and properties of a novel blue azoanthraquinone reactive dye on cotton. *Molecules* 24:1–9. <https://doi.org/10.3390/molecules24071334>
14. Popoola SA, Al Dmour H, Rakass S, et al (2022) Enhancement Properties of Zr Modified Porous Clay Heterostructures for Adsorption of Basic-Blue 41 Dye: Equilibrium, Regeneration, and Single Batch Design Adsorber. *Materials (Basel)* 15:. <https://doi.org/10.3390/ma15165567>
15. Hasani N, Selimi T, Mele A, et al (2022) Theoretical, Equilibrium, Kinetics and Thermodynamic Investigations of Methylene Blue Adsorption onto Lignite Coal. *MOLECULES* 27:. <https://doi.org/10.3390/molecules27061856>
16. Śmigiela-Kamińska D, Kumirska J, Waś-Gubała J, Stepnowski P (2020) The Identification of Cotton Fibers Dyed with Reactive Dyes for Forensic Purposes. *Molecules* 25:. <https://doi.org/10.3390/molecules25225435>
17. Miljković M, Purenović M, Stamenković M, Petrović M (2012) Determination of two reactive dyes concentration in dyed cotton fabric. *Hem Ind* 66:243–251. <https://doi.org/10.2298/HEMIND110721091M>
18. Cheng L, Farooq A, Yang HW, et al (2023) A low-dosage chemicals, short process alternative approach to reactive dyeing of golden cocoon-like silk fibers with robust color fastness. *Polym Test* 123:108035. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108035>
19. Haque ANMA, Sultana N, Sayem ASM, Smriti SA (2022) Sustainable Adsorbents from Plant-Derived Agricultural Wastes for Anionic Dye Removal: A Review. *Sustain* 14:. <https://doi.org/10.3390/su141711098>

20. Machado KMG, Compart LCA, Morais RO, et al (2006) Biodegradation of reactive textile dyes by basidiomycetous fungi from Brazilian ecosystems. *Brazilian J Microbiol* 37:481–487. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822006000400015>
21. Kieng, Kevin; Hadibarata, Tony; Elwina, Elwina; Dewi R (2016) Reactive dyes adsorption via *Citrus hystrix* peel powder and *Zea mays* cob powder: characterization, isotherm and kinetic studies. 6:1612–1620
22. Carneiro PA, Boralle N, Stradiotto NR, et al (2004) Decolourization of anthraquinone reactive dye by electrochemical reduction on reticulated glassy carbon electrode. *J Braz Chem Soc* 15:587–594. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532004000400023>
23. Alkas TR, Ediaty R, Ersam T, Purnomo AS (2022) Reactive Black 5 decolorization using immobilized Brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum*. *Mater Today Proc* 65:2934–2939. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.521>
24. Fakhr IMI, Zayed SMA (2008) Egyptian Journal of Chemistry: Preface. *Egypt J Chem* 51:647–656. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021>
25. El-Desouky MG, Hassan N, Shahat A, et al (2021) Synthesis and Characterization of Porous Magnetite Nanosphere Iron Oxide as a Novel Adsorbent of Anionic Dyes Removal from Aqueous Solution. *BIOINTERFACE Res Appl Chem* 11:13377–13401. <https://doi.org/10.33263/BRIAC115.1337713401>
26. DG MDATJA (2009) PRISMA 2020 flow diagram new SRs. Prism Statement. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed1000097>
27. Sonal S, Prakash P, Mishra BK, Nayak GC (2020) Synthesis, characterization and sorption studies of a zirconium(IV) impregnated highly functionalized mesoporous activated carbons. *RSC Adv* 10:13783–13798. <https://doi.org/10.1039/c9ra10103a>
28. Wang J, Gao Y, Zhu L, et al (2018) Dyeing property and adsorption kinetics of reactive dyes for cotton textiles in salt-free non-aqueous dyeing systems. *Polymers (Basel)* 10:. <https://doi.org/10.3390/polym10091030>
29. Guo J, Wang J, Zheng G (2019) Synthesis of cross-linking cationic starch and its adsorption properties for reactive dyes. In: *THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROTECTION*. IOP PUBLISHING LTD, DIRAC HOUSE, TEMPLE BACK, BRISTOL BS1 6BE, ENGLAND
30. Araujo FV da F, Yokoyama L, Teixeira LAC (2006) Remoção de cor em soluções de corantes reativos por oxidação com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV. *Quim Nova* 29:11–14. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422006000100003>
31. Ekambaram SP, Perumal SS, Annamalai U (2016) Decolorization and biodegradation of remazol reactive dyes by *Clostridium* species. 3 *Biotech* 6:1–8. <https://doi.org/10.1007/s13205-015-0335-0>
32. Mohamed FA, Abd El-Megied SA, Mohareb RM (2020) Synthesis and application of novel reactive dyes based on dimedone moiety. *Egypt J Chem* 63:4447–4455. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2020.24092.2437>

33. El-Asery MA, Aly AA, Ahmed DA (2022) Decolorization of Reactive Dyes, Part II: Eco-Friendly Approach of Reactive Dye Effluents Decolorization Using Geopolymer Cement Based on Slag. *Egypt J Chem* 65:49–54. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2022.146015.6355>.