

Application of Methodologies for the Optimization of the Dyeing Process in the Textile Industry: A Systematic Review of the Literature

Marga Zorayda Navarro Casafranca¹; Jumira Mayerly Santos Ruiz²; Edgar Coaquira Torres³;

Luis Enrique Cuevas Tenorio⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú,

U21230999@utp.edu.pe, U20203378@utp.edu.pe, C26817@utp.edu.pe, C28109@utp.edu.pe

Abstract- *This systematic literature review arises from the need to optimize the dyeing process in the textile industry, a critical stage due to its high consumption of resources and its influence on the quality of the finished product. This review aims to identify the most commonly used methodologies to improve the efficiency, color uniformity and sustainability of textile dyeing. A descriptive and qualitative methodology was applied under the PIOC model, analyzing 23 scientific articles in English and Spanish, published from 2020. During the analysis, the main shortcomings of the process were identified, such as low color fixation, excessive water and energy consumption, lack of uniformity and poor wash fastness. Among the most outstanding methodologies were the Response Surface Methodology (RSM), the use of artificial neural networks (ANN), optimization algorithms (Genetic Algorithm - GA, Particle Swarm Optimization - PSO), Lean-Green approaches and machine learning models. These tools showed significant improvements in production efficiency, cost reduction, energy savings and color accuracy. It was also shown that these methodologies were implemented in both artisanal and industrial companies, which demonstrates their versatility. Finally, the results validate that a correct selection and implementation of these methodologies contributes significantly to the optimization of the dyeing process and to the strengthening of competitiveness in the textile sector.*

Keywords- *Textile dyeing, Response Surface Methodology, Textile optimization, Textile quality, Dyeing industry.*

Aplicación de Metodologías para la Optimización en el Proceso de Teñido en el Rubro Textil: Una Revisión Sistemática de Literatura

Marga Zorayda Navarro Casafranca¹; Jumira Mayerly Santos Ruiz²; Edgar Coaquira Torres³;

Luis Enrique Cuevas Tenorio⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú,

U21230999@utp.edu.pe, U20203378@utp.edu.pe, C26817@utp.edu.pe, C28109@utp.edu.pe

Resumen- Esta revisión sistemática de la literatura surge de la necesidad de optimizar el proceso de teñido en la industria textil, una etapa crítica por su elevado consumo de recursos y su influencia en la calidad del producto terminado. Esta revisión tiene como objetivo identificar las metodologías más utilizadas para mejorar la eficiencia, la uniformidad del color y la sostenibilidad del teñido textil. Se aplicó una metodología descriptiva y cualitativa bajo el modelo PIOC, analizando 23 artículos científicos en inglés y español, publicados a partir del año 2020. Durante el análisis, se identificaron las principales deficiencias del proceso, como la baja fijación del color, el consumo excesivo de agua y energía, la falta de uniformidad y la escasa solidez al lavado. Entre las metodologías más destacadas se encuentran la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM), el uso de redes neuronales artificiales (ANN), algoritmos de optimización (Algoritmo Genético - GA, Particle Swarm Optimization - PSO), enfoques Lean-Green y modelos de machine learning. Estas herramientas evidenciaron mejoras significativas en la eficiencia productiva, reducción de costos, ahorro energético y precisión cromática. Asimismo, se evidenció que estas metodologías se implementaron tanto en empresas artesanales como industriales, lo cual demuestra su versatilidad. Finalmente, los resultados validan que una correcta selección e implementación de estas metodologías contribuye significativamente a la optimización del proceso de teñido y a fortalecer de la competitividad en el sector textil.

Palabras clave— Teñido textil, Metodología Superficie de Respuesta, Optimización textil, Calidad textil, Industria del teñido.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria textil se enfrenta a una creciente demanda por mejorar sus procesos de producción en términos de eficiencia, sostenibilidad y calidad. Dentro de estos procesos, el teñido representa una de las etapas más complejas y críticas, debido al alto uso de recursos como el agua, energía y sustancias químicas, así como a la necesidad de controlar múltiples parámetros para asegurar la uniformidad y solidez del color. Según lo indicado por [1], el teñido de materiales textiles es un proceso altamente sensible, determinado por variables como la concentración del colorante, el tiempo de exposición, el pH, la temperatura, el tipo de tinte y la composición de la fibra, lo que incrementa la dificultad para lograr resultados consistentes y reproducibles.

No obstante, a pesar de su relevancia, el proceso de teñido textil presenta múltiples deficiencias técnicas y ambientales. Diversos estudios han documentado que entre las deficiencias

más frecuentes se encuentran la baja solidez del color, la falta de intensidad cromática en el proceso de teñido [2], [3]. Además, se ha reportado una marcada variabilidad en la uniformidad del teñido, lo que compromete tanto la calidad del producto final como su durabilidad [4]. Estas deficiencias incrementan reprocesos, costos operativos y dificultades para cumplir estándares de calidad y sostenibilidad.

Frente a este escenario, la aplicación de metodologías de optimización ha emergido como una alternativa viable para abordar las deficiencias del teñido textil, mejorando aspectos como la eficiencia del proceso, la intensidad del color y la uniformidad del resultado final [5-7]. Aunque existen investigaciones que abordan mejoras puntuales mediante enfoques experimentales, computacionales y organizacionales [5], [8], [9]; la literatura especializada carece de una visión sistemática e integral que permita organizar y comparar los distintos enfoques utilizados. Esta carencia dificulta la identificación de patrones, vacíos y oportunidades de mejora, limitando su aplicación práctica en el sector productivo.

En este contexto, la solución propuesta es una revisión sistemática que organiza y compara metodologías de optimización del teñido textil. La innovación del estudio radica en integrar enfoques experimentales, computacionales y organizacionales aplicables a empresas artesanales e industriales. Los resultados de esta revisión pueden ser útil tanto para el ámbito académico como para el profesional entorno al rubro textil, al ofrecer una base técnica que permita apoyar el proceso de toma de decisiones y aporte a un proceso de teñido más eficiente, reproducible y orientado a la mejora del producto final.

Por tanto, la presente Revisión Sistemática de Literatura establece como propósito comprender y representar el estado actual de las metodologías empleadas para optimizar el proceso de teñido en la industria textil. En concreto, se busca identificar, clasificar y analizar estrategias experimentales, computacionales y organizacionales aplicadas a la mejora del teñido, considerando el tipo de empresa en que se implementan, los niveles de optimización alcanzados y las deficiencias que abordan. Esta visión estructurada permitirá aportar soluciones

fundamentadas y prácticas que favorezcan la toma de decisiones basadas en los procesos de teñido textil.

Considerando esto, la estructura del documento se detalla a continuación. La sección I, Introducción, presenta las deficiencias identificadas en el proceso de teñido textil, así como las consecuencias derivadas de estas fallas. La sección II, Metodología, describe el enfoque utilizado para llevar a cabo la revisión sistemática, abarcando la elaboración de las preguntas de investigación, así como la definición de los criterios empleados para incluir o excluir estudios, junto con el método aplicado en la selección de los trabajos evaluados. En la sección III, Resultados, se exponen los descubrimientos obtenidos, estructurados conforme a las preguntas de investigación planteadas. La sección IV, Discusión, aborda la interpretación de los hallazgos en relación con las preguntas planteadas, señalando sus implicancias, limitaciones y aportes. Finalmente, en la sección V, el documento concluye con una síntesis de los hallazgos más relevantes. A diferencia de estudios previos, esta investigación no solo recopila metodologías de optimización, sino que las clasifica según su aplicabilidad en contextos artesanales e industriales, además de identificar brechas críticas relacionadas con la escalabilidad y la integración de soluciones sostenibles.

II. METODOLOGÍA

En la revisión sistemática de la literatura se aplicó la metodología PIOC (Problema, Intervención, Resultado y Contexto) [10], sin incluir un metaanálisis. Esta herramienta permitió formular la siguiente pregunta principal de investigación: ¿Cuál es la metodología más usada para la mejora del proceso de producción de teñido en la industria textil? A partir de esta interrogante central, se derivaron cuatro sub-preguntas específicas vinculadas a cada uno de los componentes del modelo PIOC, tal como se detalla en la Tabla I.

Asimismo, la base de datos Scopus fue seleccionada debido a su amplia cobertura de revistas científicas de alto impacto en el ámbito de la ingeniería y la industria textil. No obstante, se reconoce que la inclusión de otras bases de datos, como Web of Science o ScienceDirect, podría ampliar el alcance de la revisión, lo cual constituye una limitación del presente estudio.

TABLA I
PREGUNTAS POR CADA COMPONENTE DEL PIOC

P	Problema	¿Cuáles son las principales deficiencias en el proceso de teñido?
I	Intervención	¿Qué metodologías han sido empleadas en las investigaciones para la mejora?
O	Resultado	¿Qué niveles de optimización han obtenido las metodologías?
C	Contexto	¿En qué tipo de empresas del rubro textil se han implementado las metodologías?

Se determinó las palabras clave por cada componente del modelo PIOC como se observa en la Tabla II.

TABLA II
PALABRAS CLAVE

P	Problema	Deficiencia en el proceso de teñido	Textile dyeing
			Dyeing
			Color wear dyeing
			Dyeing process
			Fabric dyeing
I	Intervención	Aplicación de metodologías en el proceso de teñido	Methodology
			Method*
			Dyeing process improvement
			Textile optimization
			Dyeing improvement
O	Resultado	Optimización en el proceso de teñido	Process optimization
			Optimization
			Production efficiency
			Productivity
			Textile quality
C	Contexto	Industria textil	Textile industry
			Textile sector
			Dyed industry
			Textile
			Dyeing industry

Nota: El símbolo (*) indica términos utilizados como comodines en la ecuación de búsqueda.

A partir de las palabras clave identificadas, se elaboró la siguiente ecuación de búsqueda para desarrollar la revisión sistemática de la literatura. Como resultado, se derivó la siguiente ecuación de búsqueda.

("Textile dyeing" OR Dyeing OR "Color wear dyeing" OR "Dyeing process" OR "Fabric dyeing" AND Methodology OR Method* OR "Dyeing process improvement" OR "Textile optimization" OR "Dyeing improvement" AND "Process optimization" OR Optimization OR "Production efficiency" OR Productivity OR "Textile quality" AND "Textile industry"

OR "Textile sector" OR "Dyed industry" OR Textile OR "Dyeing industry")

Asimismo, se establecieron criterios de inclusión aplicados para la elección de las investigaciones, los cuales se describen a continuación:

- CI 1 Los artículos seleccionados deben abordar el tema de los problemas o fallas que hay en el proceso de teñido.
- CI 2 Los artículos deben presentar o explicar metodologías orientadas a mejorar el proceso de teñido.
- CI 3 Los artículos considerados deben mostrar resultados positivos obtenidos al aplicar esos métodos.

De igual forma, se definieron los criterios de exclusión aplicados en la selección de los estudios, los cuales se detallan a continuación:

- CE 1 El documento no corresponde a una investigación original.
- CE 2: Publicaciones redactadas en idiomas que no sean inglés o español.
- CE 3: Documentos publicados antes del 2020.
- CE 4 Estudios no son recuperables y/o descargables.

Conforme a lo descrito previamente, los estudios seleccionados fueron sometidos a una evaluación rigurosa utilizando la herramienta PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)[11]. Esta herramienta permite estructurar y reportar de manera sistemática los resultados de revisiones de literatura, asegurando la transparencia, coherencia y calidad del proceso de selección y análisis de las fuentes. Su aplicación tuvo como propósito estandarizar la presentación de los datos extraídos, facilitando su interpretación y permitiendo una comparación más precisa entre los diferentes estudios incluidos.

Mediante la utilización del diagrama de flujo PRISMA, que se muestra en la Figura 1, fue posible documentar detalladamente cada fase del proceso de revisión, desde la detección inicial de los estudios a través de las bases de datos científicas, pasando por el proceso de selección y cribado, hasta la inclusión final de los artículos pertinentes. Esto permitió asegurar que todos los trabajos considerados cumplieran con los criterios de elegibilidad establecidos, al tiempo que se mantenía la trazabilidad del procedimiento.

De esta manera, se garantizó que la evidencia recopilada no solo respondiera de forma directa a la pregunta de investigación planteada, sino que contribuyera con información de respaldo sólida, confiable y útil para la comunidad científica interesada en la temática abordada.

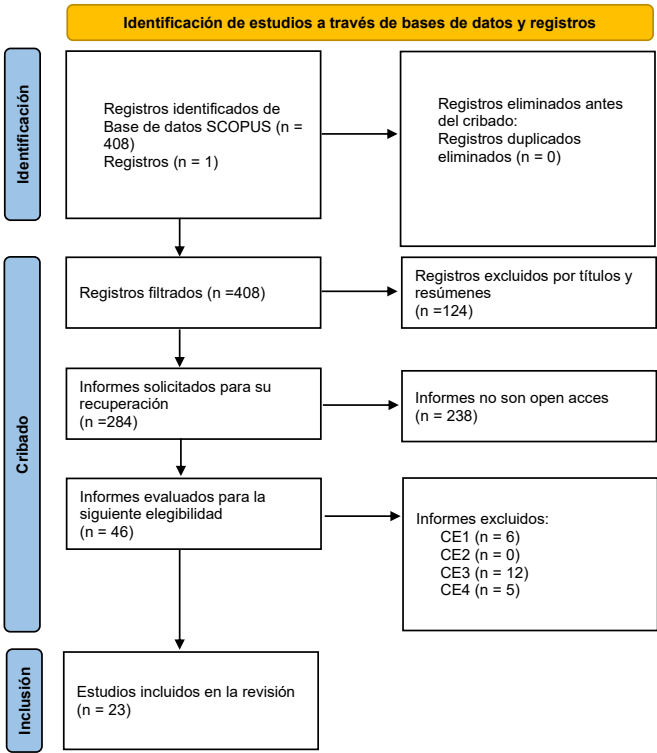


Figura 1. Esquema de diagrama prisma propuesta

III. RESULTADOS

III.I. RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

Para esta investigación, los artículos fueron clasificados de acuerdo con su año de publicación y el país de origen. Tal como se muestra en la figura 2, el año que registró la mayor contribución científica fue 2024, con un total de 9 publicaciones, seguido por 2022, que aportó 5 artículos al análisis.

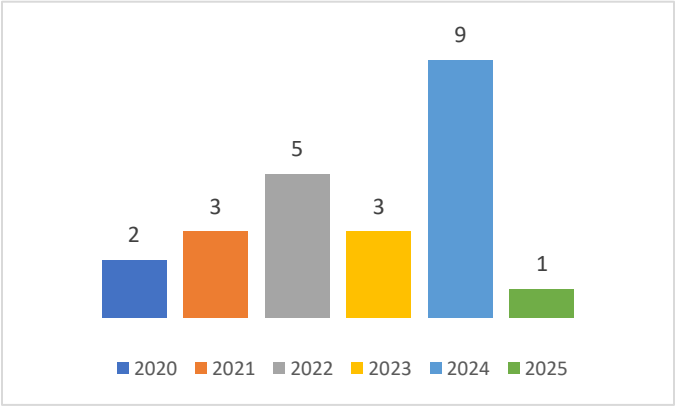


Figura 2. Estudios según su año de publicación.

En relación con el país de origen, la figura 3 evidencia que Pakistán fue el principal contribuyente científico, con un total de 4 artículos incluidos en esta investigación. Asimismo, se incorpora 3 publicaciones provenientes de China.



Figura 3. Estudios según su país de origen.

Es fundamental tener en cuenta que la interpretación de los resultados contribuirá significativamente a la comprensión y al abordaje de los objetivos planteados en la revisión sistemática de literatura, tanto en su enfoque general como en los objetivos específicos.

III.II. RESULTADOS DE INGENIERÍA

Los resultados del análisis de los 23 artículos seleccionados se presentan a continuación, organizados en tablas e información tanto cualitativa como cuantitativa. Esta sección da respuesta a las interrogantes previamente formuladas en el estudio, proporcionando una visión detallada de los hallazgos más relevantes.

A. ¿Cuáles son las principales deficiencias en el proceso de teñido?

El análisis del estudio revela varias deficiencias en los procesos de teñido; una de las más recurrentes es la baja eficiencia de absorción del tinte, lo que implica un alto desperdicio de colorante y bajo rendimiento del proceso [5], [3], [8]. Una gran proporción de colorante no se fija al sustrato textil, especialmente en el caso de los tintes naturales, lo que ocasiona baja intensidad de color y poca solidez al lavado y a la luz [4], [9], [12], [13].

El inadecuado manejo de residuos líquidos con colorante no fijado representa un problema ambiental grave, ya que estos residuos suelen ser vertidos sin tratamiento adecuado, generando una liberación significativa de colorantes al entorno [14], [15].

También, se reporta falta de uniformidad en el teñido, como colores desiguales, degradé incorrecto o manchas [6], [16], [2],

[17]. En algunos casos, se observaron daños a las fibras derivados de parámetros inadecuados del proceso [2]

Asimismo, existen deficiencias desde el punto de vista operativo, según los artículos estudiados destacan el consumo excesivo de agua, energía y productos químicos como un problema crítico [5], [18], [19], [1]. También se evidencian errores logísticos como una inadecuada asignación de maquinaria, deficiente programación de procesos o errores en la formulación del color [7], [1].

Por otro lado, se presentan como deficiencias desde los aspectos técnicos la baja reproducción precisa del color (diferencia de color: ΔE^*) y la ineficiencia en la fijación del color la cual fueron señalados como limitantes de calidad [20], [21].

A partir del análisis de los estudios revisados, se identificaron diversas deficiencias técnicas, operativas y ambientales, las cuales se consolidan y clasifican en la Figura 4.

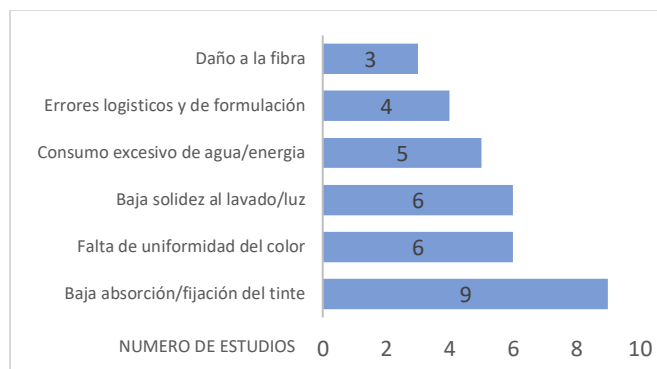


Figura 4. Principales deficiencias del proceso de teñido.

B. ¿Qué metodologías han sido empleadas en las investigaciones para la mejora?

Para abordar estas deficiencias, los estudios implementaron diversas metodologías de mejora. Entre las más destacadas se encuentran el uso frecuente de la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) en variantes como el diseño Box-Behnken y el diseño compuesto central (CCD), usualmente combinadas con ANOVA [6], [15], [16], [22], [2], [23], [12], [8], [1].

También se destaca la aplicación de tecnologías de inteligencia artificial, tales como Redes Neuronales Artificiales (ANN) y algoritmos de optimización (Algoritmo genético (GA), Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), Grey Wolf Optimizer (GWO)), incluyendo técnicas híbridas como algoritmo de optimización global (PSO) - algoritmos de optimización local (FMIN), aplicadas para modelar y optimizar el comportamiento del teñido textil en función de múltiples

variables de entrada y salida [5], [7], [1]. En el estudio [7] se incorporó redes neuronales LSTM para modelar dinámicamente la evolución del proceso de teñido y predecir variaciones críticas en tiempo real.

Asimismo, dos estudios adoptan un enfoque comparativo experimental para contrastar el teñido convencional con métodos alternativos, como el teñido in situ, donde el proceso ocurre directamente sobre el material o en el lugar del sustrato final [14], o el blanqueo asistido por UVA y peróxido de hidrógeno [24]. Otros tres estudios optaron por diseños estadísticos como Plackett-Burman, factorial 2, Taguchi (L27), y análisis multivariado con herramientas como MINITAB[4], [3] - [18]. También se implementaron modelos de “aprendizaje automático” machine learning como LSSVR, PCR, PLSR y lógica difusa, en combinación con modelos estadísticos clásicos[18].

Desde el enfoque organizacional, el estudio [20] implementó metodologías Lean-Green, utilizando herramientas como Kaizen, SMED, TPM y planificación verde (GMP) para lograr una mayor eficiencia productiva y mitigar el impacto ambiental.

Además, el estudio [25] empleó modelos de programación entera mixta (MIP) y metaheurísticas como ALNS (Adaptive Large Neighborhood Search) para optimizar la planificación de operaciones en procesos de teñido.

Por último, cinco estudios integraron análisis fisicoquímicos como espectrofotometría UV-Vis, pruebas de solidez ISO, colorimetría instrumental (diferencia de color: ΔE , intensidad de color: K/S) y microscopía electrónica (SEM) para validar la calidad del teñido [17], [21], [19], [13], [1]. Asimismo, estas metodologías se agrupan en distintas categorías, las cuales se detallan en la Tabla III y se resumen gráficamente en la Figura 5.

TABLA III

Metodología de Superficie de Respuesta (RSM)	[8], [12], [15], [6], [16], [2], [1], [22], [23]
Algoritmos de optimización (GA, PSO, etc)	[10], [1], [7], [21], [22]
Redes Neuronales Artificiales (ANN)	[5], [17], [1], [7]
Diseños experimentales (Taguchi, Plackett-Burman, factoria)	[3], [4], [18], [23]
Lean-Green/Gestión organizacional	[19], [20]

Machine Learning (LSSVR, PLSR, Fuzzy Logic)	[3], [18]
Programación matemática (MIP, ALNS)	[25]

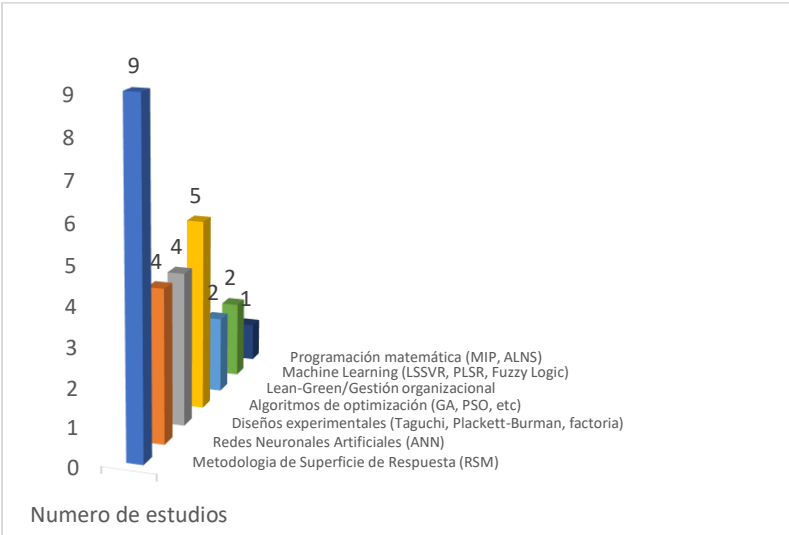


Figura 5. Metodologías empleadas en el proceso de teñido.

C. ¿Qué niveles de optimización han obtenido las metodologías?

En cuanto a los resultados obtenidos mediante las distintas metodologías, la Figura 6 presenta los principales niveles de optimización alcanzados.

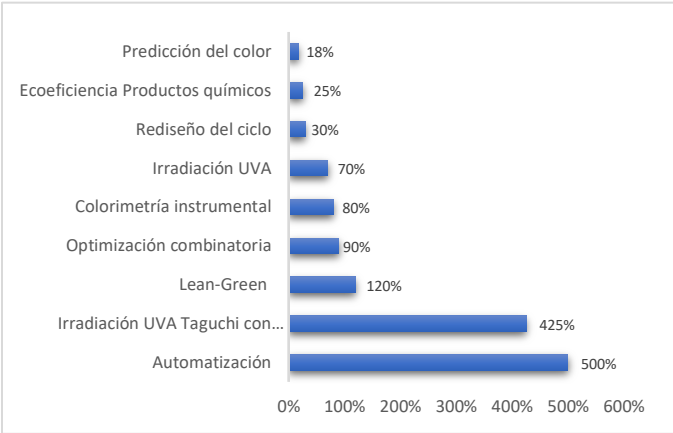


Figura 6. Niveles de optimización obtenidos por metodología.

Mediante las distintas metodologías, todos los estudios evidenciaron mejoras significativas en términos de eficiencia, calidad y sostenibilidad. Según Vadood y Haji, la aplicación de

redes neuronales artificiales permitió mejorar significativamente la predicción de coordenadas de color en tejidos celulósicos, logrando una reducción del 58.2 % en costos operativos y un aumento de productividad del 500 % tras automatizar el teñido artesanal de alpaca [5]. Por otro lado, el uso de irradiación UVA en el pretratamiento de algodón/spandex reportó un ahorro energético del 70 % y una mejora del 47.79 % en blancura [14]. Asimismo, la integración de Taguchi con machine learning mejoró la predicción del teñido con un 425 % menos de error respecto a modelos tradicionales [6].

Por su parte, el enfoque Lean-Green permitió una mejora del 120 % en productividad, con una reducción del 43 % en consumo eléctrico y del 50 % en reprocesos [4]. La formulación cromática asistida por software logró diferencias de color menores a $\Delta E^* = 3.0$ en la mayoría de las muestras, asegurando alta precisión [15].

Adicionalmente, con la optimización combinatoria del teñido por lotes, se redujo el tiempo de planificación de horas a minutos y se minimizó el uso de recursos y reprocesos [16]. También, se evidenció una reducción del 30 % en el ciclo de teñido [12], una mejora del 18 % en la precisión del color [2], y una disminución del 25 % en el uso de químicos [19].

D. ¿En qué tipo de empresas del rubro textil se han implementado las metodologías?

Según los 23 artículos revisados, las metodologías se implementaron en dos principales tipos de entornos: empresas artesanales e industriales.

Las empresas artesanales, caracterizadas por el uso de procesos manuales o semi-manuales, estuvieron presentes en 8 estudios analizados. Las mejoras se enfocaron en rediseñar procesos tradicionales, reducir reprocesos y aprovechar tintes naturales, conservando la esencia del trabajo manual [5], [15], [9], [3], [8], [17], [21] - [19].

Por otro lado, las empresas industriales fueron el contexto predominante en la revisión, apareciendo en 15 estudios. Estos estudios aplicaron metodologías avanzadas como Lean, optimización de lotes y modelos predictivos en plantas automatizadas o simulaciones a gran escala, usando principalmente tintes sintéticos [14], [6], [4], [16], [22], [2], [24], [23], [12], [18], [20], [7], [13], [1] - [25].

La distribución de la aplicación de estas metodologías según el tipo de empresa se presenta en la Figura 7.

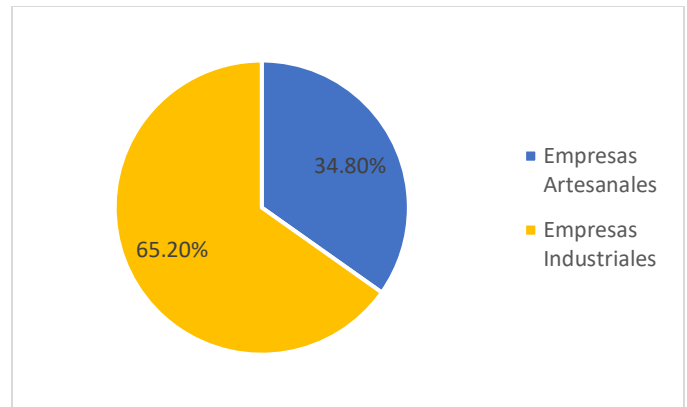


Figura 7. Tipos de empresas donde se implementaron las metodologías.

Como se muestra en el gráfico, las metodologías se implementaron en empresas artesanales e industriales, demostrando su aplicabilidad en distintos niveles de producción.

IV. DISCUSIÓN

El hallazgo más relevante de esta revisión sistemática es la identificación de una diversidad de metodologías de optimización que han demostrado mejoras sustantivas en eficiencia y calidad del proceso de teñido textil. Las técnicas más aplicadas fueron la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM), redes neuronales artificiales (ANN), Algoritmos de Optimización y enfoques Lean-Green [1], [5], [8], [12], [20]. La importancia de este hallazgo radica en que confirma una tendencia creciente hacia la adopción de herramientas estadísticas y computacionales avanzadas para resolver los problemas técnicos y ambientales más persistentes del teñido, tales como la baja fijación del colorante, la falta de uniformidad del color, y la baja intensidad del color [2], [4], [3].

En términos comparativos, los estudios revisados coinciden en que las deficiencias más críticas en el teñido son la baja intensidad de color, la escasa solidez al lavado y la ineficiencia en la absorción del colorante [4], [9], [13], lo cual concuerda con investigaciones previas que también identifican estas fallas como cuellos de botella en la mejora del proceso [17], [19], [21]. Sin embargo, esta revisión añade un matiz distintivo al vincular dichas deficiencias no solo con aspectos técnicos, sino también con variables organizacionales y de escala de producción, como la asignación ineficiente de maquinaria o la ausencia de control estadístico del proceso [7], [25].

Respecto a las metodologías aplicadas, esta revisión permite afirmar que el uso combinado de técnicas experimentales (como RSM y Taguchi) y modelos predictivos (ANN, GA, PSO, etc.) ha sido especialmente efectivo en

reducir la variabilidad del teñido, mejorar la reproducción cromática y minimizar el uso de recursos [1], [5], [6], [16], [18]. No obstante, se detecta una dispersión metodológica entre estudios, con diferencias en el tipo de fibras, colorantes y condiciones experimentales, lo cual dificulta una comparación directa de la efectividad entre métodos. Esta heterogeneidad plantea una limitación importante del estudio.

Sobre la optimización obtenida, los resultados muestran mejoras cuantificables y significativas. Por ejemplo, en el estudio [5] se reportó un aumento del 500 % en productividad mediante la automatización del teñido artesanal, mientras que el estudio [24] lograron una reducción del 70 % en el consumo energético usando irradiación UVA en el pretratamiento. Estas cifras validan empíricamente que las metodologías aplicadas tienen impacto real, no solo teórico.

En relación con el contexto de aplicación, se encontró que las metodologías son aplicables tanto en empresas artesanales como industriales, aunque con enfoques distintos: en las artesanales predomina el rediseño de procesos tradicionales y el uso de tintes naturales [5], [3], [15], mientras que en las industriales se opta por automatización, planificación computacional y simulaciones complejas [14], [20], [25]. Esta dualidad representa una fortaleza del campo, al evidenciar que la innovación puede adaptarse a distintos niveles tecnológicos y productivos.

A pesar de los avances reportados en la literatura, la mayoría de los estudios se enfocan en mejoras aisladas y no en soluciones integrales del proceso de teñido. Las metodologías experimentales predominan en contextos artesanales, mientras que los enfoques computacionales y de optimización son más frecuentes en entornos industriales. Sin embargo, existe una limitada integración de modelos híbridos que combinen ambos enfoques. Asimismo, aunque la sostenibilidad es un tema recurrente, suele abordarse principalmente desde una perspectiva ambiental, dejando de lado aspectos económicos y de escalabilidad. Esto evidencia una brecha crítica en la literatura, resaltando la necesidad de desarrollar modelos integrales que articulen eficiencia, sostenibilidad y aplicabilidad industrial.

V. CONCLUSIÓN

Se concluye que el proceso de teñido textil presenta diversas deficiencias técnicas y ambientales que comprometen tanto la calidad del producto. En particular, se identificaron problemas recurrentes como la baja fijación del colorante, la falta de uniformidad en el teñido, la escasa solidez al lavado y su alto uso intensivo insumos como agua, energía y compuestos químicos. Estas deficiencias representan obstáculos clave que deben ser abordados para lograr procesos más eficientes y reproducibles, tanto en contextos industriales como artesanales.

En respuesta a estas problemáticas, la revisión permitió identificar una amplia gama de metodologías aplicadas para optimizar el proceso de teñido. Entre ellas destacan los diseños experimentales como RSM y Taguchi, los modelos computacionales como las redes neuronales artificiales (ANN), los algoritmos de optimización evolutiva (GA, PSO) y los enfoques organizacionales Lean-Green. Estas estrategias, al ser combinables y adaptables, ofrecen soluciones efectivas para modelar, controlar y mejorar los parámetros críticos del teñido textil.

Como resultado de la implementación de estas metodologías, los estudios revisados reportan mejoras concretas considerando aspectos como la productividad, la optimización de costos, ahorro energético, la mejora de la uniformidad en el teñido, el elevado uso de recursos como el agua, la energía y productos químicos, y la ineficiente fijación del color, que afecta la solidez y la reproducibilidad cromática. Estos niveles de optimización evidencian el impacto positivo de aplicar enfoques integrales y basados en datos, lo cual valida su utilidad no solo en entornos académicos, sino también en escenarios reales de producción.

Asimismo, es importante señalar que estas metodologías han sido implementadas con éxito en distintos tipos de empresas del rubro textil. Por un lado, en empresas artesanales se enfocaron en adaptar tecnologías al trabajo manual y sostenible, mientras que en empresas industriales se emplearon sistemas avanzados de automatización y planificación. Esto demuestra que la optimización del teñido no está limitada por el tamaño o grado de tecnificación de la empresa, sino que puede ser escalada y contextualizada según las necesidades del entorno productivo.

Finalmente, se identifica como limitación del estudio la heterogeneidad de metodologías y condiciones experimentales en los artículos analizados, lo que dificulta la comparación directa de resultados. En este sentido, futuras investigaciones deberían orientarse al desarrollo de marcos estandarizados de evaluación y modelos integrados de optimización aplicables a distintos contextos del sector textil.

REFERENCIAS

- [1] F. Shahmoradi Ghaheh, M. Razbin, M. Tehrani, L. Zolfipour Aghdam Vayghan, and M. Sadrjani, "Modeling and optimization of dyeing process of polyamide 6 and woolen fabrics with plum-tree leaves using artificial intelligence," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-64761-7.
- [2] P. Chitichotpanya, N. Vuthiganond, T. Inprasit, B. Klaykruayat, and S. Srisuk, "Extraction of lutein dye from Tagetes erecta garland waste for green dyeing of hemp fabric using response surface methodology," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 32, no. 4, pp. 47–58, 2022, doi: 10.55713/JMMM.V32I4.1527.
- [3] F. Shafiq *et al.*, "Extraction of natural dye from aerial parts of argy wormwood based on optimized taguchi approach and functional finishing of cotton fabric," *Materials*, vol. 14, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/ma14195850.

- [4] J. García-Lapuente, E. Olvera-Quintanar, E. Tapia-Mendoza, and G. A. Cruz-Moreno, "Optimization of red hue in wool dyeing using Mexican cochineal through sequential experimental designs," *Journal of the Textile Institute*, 2025, doi: 10.1080/00405000.2025.2457581.
- [5] M. Vadood and A. Haji, "Application of ANN Weighted by Optimization Algorithms to Predict the Color Coordinates of Cellulosic Fabric in Dyeing with Binary Mix of Natural Dyes," 2022, doi: 10.3390/coatings.
- [6] V. T. Lam *et al.*, "Process optimization studies of congo red dye adsorption onto magnesium aluminium layered double hydroxide using response surface methodology," *Pol J Environ Stud*, vol. 30, no. 1, pp. 679–687, 2021, doi: 10.15244/pjoes/121048.
- [7] K. Yılmaz, İ. Ö. Aksu, M. Göçken, and T. Demirdelen, "Sustainable Textile Manufacturing with Revolutionizing Textile Dyeing: Deep Learning-Based, for Energy Efficiency and Environmental-Impact Reduction, Pioneering Green Practices for a Sustainable Future," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 18, Sep. 2024, doi: 10.3390/su16188152.
- [8] M. Yameen *et al.*, "Enhancing wool dyeing with clove bud (*Syzygium aromaticum*) based natural dye via microwave treatment using a central composite design," *Sci Prog*, vol. 106, no. 4, Oct. 2023, doi: 10.1177/00368504231215593.
- [9] A. S. Larco Cárdenas, A. L. Paz Paz, M. F. Zúñiga Núñez, and J. A. Aguilar Franco, "Design and Validation of a Degraded Dyeing Process for Alpaca Fibra Parts," *Produccion y Limpia*, vol. 17, no. 2, pp. 6–22, 2021, doi: 10.22507/PML.V17N2A1.
- [10] C. M. da C. Santos, C. A. de M. Pimenta, and M. R. C. Nobre, "The PICO strategy for the research question construction and evidence search," *Rev Lat Am Enfermagem*, vol. 15, no. 3, pp. 508–511, Jun. 2007, doi: 10.1590/S0104-11692007000300023.
- [11] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, p. n71, Mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [12] A. Ketema and A. Worku, "Optimization of Process Conditions of Cotton Fabric Dyeing with Nettle Leaf Extract for Antibacterial Application Using Central Composite Design," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 2, 2023, doi: 10.1080/15440478.2023.2228485.
- [13] M. Souissi, S. Chaouch, and A. Moussa, "Color matching of bicomponent (PET/PTT) filaments with high performances using genetic algorithm," *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61608-z.
- [14] J. A. Houghton, A. Tidder, M. Stenton, and R. S. Blackburn, "Coloration in Flow: The Potential of In Situ Coloration of Casein Fibers to Mitigate Environmental Impact of Traditional Dyeing Methods," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 12, no. 6, pp. 2130–2134, Feb. 2024, doi: 10.1021/acssuschemeng.3c07437.
- [15] M. Kumari, M. Gahlot, A. Rani, and Sakshi, "Extraction of natural dye from the leaves of wild himalayan pear (*Pyruspashia*) and optimization of the dyeing parameters using box-behnken design (rsm)," *Journal of Applied and Natural Science*, vol. 12, no. 4, pp. 497–503, 2020, doi: 10.31018/jans.v12i4.2383.
- [16] U. H. Siddiqua *et al.*, "Hetero-functional azo reactive dyes applied on cellulosic fabric and dyeing conditions optimization to enhance the dyeing properties," *J Eng Fiber Fabr*, vol. 16, 2021, doi: 10.1177/1558925021996710.
- [17] W. Tegegne, A. Haile, Y. Zeleke, Y. Temesgen, H. Bantie, and S. Biyable, "Natural dyeing and anti bacterial finishing of cotton fabric with extracts from *Justicia schimperiana* leaf extract: a step towards sustainable dyeing and finishing," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1080/19397038.2023.2301702.
- [18] M. N. Pervez, W. S. Yeo, L. Lin, X. Xiong, V. Naddeo, and Y. Cai, "Optimization and prediction of the cotton fabric dyeing process using Taguchi design-integrated machine learning approach," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-39528-1.
- [19] I. Cabral, A. Schuch, and F. Steffens, "Color Biomimetics in Textile Design: Reproduction of Natural Plant Colors through Instrumental Colorant Formulation," *J Imaging*, vol. 10, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.3390/jimaging10070150.
- [20] A. De-La-Flor, M. Vigil, and M. F. Ruiz-Ruiz, "Improvement of the sustainable performance in a textile company using the lean-green methodology," *International Journal of Production Management and Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 105–116, 2024, doi: 10.4995/ijpme.2024.20260.
- [21] Q. ul Ain *et al.*, "Multifunctional Analysis of Banana Leaves Extracts for Dyeing Properties of Pima Cotton Fabric Using Different Mordants," *Nat Prod Commun*, vol. 19, no. 2, Feb. 2024, doi: 10.1177/1934578X241231463.
- [22] M. Verma, S. S. J. Singh, and N. M. Rose, "Optimization of reactive dyeing process for chitosan treated cotton fabric," 2022.
- [23] M. Ben Ticha, N. Slama, N. Dhouibi, C. Boudokhane, and H. Dhaouadi, "Valorization of Juglans regia. L Bark Residues as a Natural Colorant Based on Response Surface Methodology: A Challenging Approach to a Sustainable Dyeing Process for Acrylic Fabrics," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/su14074134.
- [24] Q. Li, X. Zhao, H. Quan, and Y. Zhou, "Establishing an energy-saving scouring/bleaching one-step process for cotton/spandex fabric using UVA-assisted irradiation," *RSC Adv*, vol. 12, no. 15, pp. 9404–9415, Mar. 2022, doi: 10.1039/d2ra00659f.
- [25] E. Duran, C. Ozturk, and M. A. Ornek, "Combinatorial optimization methods for yarn dyeing planning," *Flex Serv Manuf J*, Mar. 2024, doi: 10.1007/s10696-024-09541-1.