

# Use of the enzymatic method for wastewater treatment in the textile sector: A systematic literature review

Ordaya Barzola, Jhojan Osler<sup>1</sup> ; Renteros La Rosa, Christine Marjory<sup>2</sup>   
<sup>1,2</sup>Univesidad Tecnológica del Perú, Peru, [1524696@utp.edu.pe](mailto:1524696@utp.edu.pe), [u20216735@utp.edu.pe](mailto:u20216735@utp.edu.pe)

**Abstract**– This systematic review, carried out under the PRISMA methodology, aims to investigate the use of the enzymatic method for wastewater treatment, specifically in the textile sector, to know its benefits and performance for bioremediation. Studies in the area of pre-treatment, laundry and dyeing were taken into account in order to find the highest degree of decomposition of pollutants in their wastewater. Eighty-eight articles were analysed in which the main area studied was the dyeing area, where the highest percentage of remediation resulted from the use of enzymes from bacteria and fungi, which means that these enzymes are more efficient in terms of decolourisation. Therefore, the articles mention aspects such as definition of enzymes, main pollutants, parameters taken into account, research areas and results of wastewater decolourisation. Consultation of reliable databases is important as it not only supports the quality of information, but also legitimises the findings and contributes to the construction of rigorous scientific knowledge. Finally, an emphasis is developed on the use of the enzymatic method as an ecological alternative for the decontamination of wastewater in the textile sector.

**Keywords**- Wastewater; enzymes; textile sector; enzymatic treatment; bioremediation; textile sector.

# Uso del método enzimático para el tratamiento de aguas residuales en el sector textil: Una revisión sistemática de literatura

Ordaya Barzola, Jhojan Osler<sup>1</sup> ; Renteros La Rosa, Christine Marjory<sup>2</sup>   
<sup>1,2</sup>Univesidad Tecnológica del Perú, Peru, 1524696@utp.edu.pe, u20216735@utp.edu.pe

**Resumen**– En la presente revisión sistemática, realizado bajo la metodología PRISMA, tiene como objetivo investigar el uso del método enzimático para el tratamiento de aguas residuales, específicamente en el sector textil, conocer sus beneficios y rendimiento para la biorremediación. Se tomaron en cuenta estudios en el área de pretratamiento, lavandería y tintorería para encontrar el mayor grado de descomposición de contaminantes en sus aguas residuales. Se analizaron 88 artículos en los cuales la principal área estudiada ha sido la de tintorería, cuyo porcentaje mayor de remediación resultó en el uso de enzimas provenientes de bacterias y hongos, esto quiere decir que estas enzimas son más eficientes en cuanto a decoloración. Por lo tanto, los artículos mencionan aspectos como definición de enzimas, principales contaminantes, parámetros tomados en cuenta, áreas de investigación y resultados de la decoloración de agua residuales. Es importante la consulta de bases de datos confiables puesto que no solo respalda la calidad de información, sino que también legitima los hallazgos y contribuye a la construcción de conocimiento científico riguroso. Finalmente, se desarrolla un énfasis en el uso del método enzimático como alternativa ecológica para la descontaminación de aguas residuales en el sector textil.

**Palabras clave**– Aguas residuales; enzimas; sector textil; tratamiento enzimático; biorremediación; sector textil.

## I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años se ha identificado a la industria textil como una de las mayores consumidoras de agua, procesos como el pretratamiento, teñido, lavado y acabado de textiles requieren grandes cantidades de agua. En muchos casos, esta agua termina siendo descargada como aguas residuales sin tratamiento de limpieza. Una forma de disminuir la producción de aguas residuales en un 50% es la extracción enzimática en comparación con otros métodos [1].

Recientemente las enzimas han tomado importancia en la industria para deshacerse de los productos químicos agresivos que contaminan el medio ambiente. Un elemento para incrementar el rédito catalizador, la técnica de reciclaje y la consistencia de las enzimas es la inmovilización [2]. Está comprobado que la enzima lacasa tiene la capacidad de descomponer colorantes de tipo sintético en las aguas residuales [3]. La lacasa inmovilizada mostró un rendimiento constante a lo largo de cuatro ciclos de decoloración [4].

Desafortunadamente, el 20% de la contaminación del agua es causada por la industria textil, por los químicos provenientes del teñido, acabado o pretratamiento. Además, las aguas residuales de estos procesos son uno de los contaminantes más peligrosos. Al liberar los productos químicos provenientes del pretratamiento de textiles, produce toxicidad en el agua limpia contaminando el medio acuático [5].

Existe información actualizada sobre el tratamiento de aguas residuales mediante procesos físicos como la filtración, floculación y adsorción, también químicos como la oxidación, pero con poca eficiencia en el resultado, ya que son poco biodegradables y tóxicos, por esa razón, es importante sintetizar la información de los tratamientos ecológicos con enzimas y realizar una revisión sistemática.

En esta revisión, el objetivo es conocer la manera en la que el método enzimático se utiliza para el tratamiento de aguas residuales en el sector textil. Por lo tanto, se pretende identificar los tipos de enzimas aplicadas a distintos sustratos para su remediación.

La disposición de la presente RSL se organiza de la siguiente manera. En la sección II se muestra el desarrollo de la investigación usando la metodología PIOC y PRISMA, la cual se adapta al documento. A continuación, en la sección III con los artículos seleccionados se precisan los resultados obtenidos de estos y una alternativa de documentación para la apreciación de los lectores. Luego, en la sección IV se desarrolló la discusión de la investigación con las sugerencias elaboradas por los autores. Por último, en la sección V se muestra las conclusiones y recomendaciones a partir de los descubrimientos encontrados en la revisión.

## II. METODOLOGÍA

La revisión sistemática (RSL) es un tipo de estudio constituido, sugerencial, recapitulativo y complementario en el que se reúnen investigaciones sobre la misma pregunta. Por ello, existen dos formas de revisión sistemática: "cuantitativa o metaanálisis" y "cualitativa u análisis". La principal causa de las diferencias es el uso de procedimientos estadísticos, lo que permite la agrupación y análisis cuantitativo de los

descubrimientos de cada estudio [6]. Una RSL, tiene como finalidad agrupar toda la información con certeza que esté sujeta antes a parámetros ya definidos, con la finalidad de responder una interrogativa de investigación científica [7].

A continuación, se explica cómo se formuló la interrogativa de revisión de literatura científica utilizando el método PIOC. El “Problema” que se planteó son las aguas residuales. Por consiguiente, en la “intervención” se formuló el uso de métodos biológicos para su aplicación, en este caso el uso del método enzimático. Para el “resultado” se buscó la optimización del tratamiento de aguas residuales mediante el uso de método enzimático. Finalmente, el “contexto” es el sector textil.

Según el tema propuesto, se ha planteado la siguiente pregunta de investigación:

¿De qué manera el método enzimático se utiliza para el tratamiento de aguas residuales en el sector textil?

Como resultado, se formularon las siguientes subpreguntas:

RQ1: ¿Cómo se aplicó el método enzimático en las aguas residuales?

RQ2: ¿Qué enzimas se han aplicado para el tratamiento de aguas residuales?

RQ3: ¿En qué medida se ha optimizado el tratamiento de las aguas residuales?

RQ4: ¿En qué áreas del sector textiles se ha investigado?

Para garantizar la relevancia y precisión de la información que se buscó, son esenciales las palabras claves utilizadas en el tema. Se empleó solo contenido específico y así evitar la sobrecarga de información irrelevante al seleccionar palabras clave adecuadas. Además, las palabras clave permitieron segmentar, encontrar y compartir información específica a otros investigadores y profesionales del campo. Por esa razón, el uso de palabras clave agilizó la búsqueda, elección y resumen de la literatura relevante, ya que ayudó a definir y centrar el tema.

Las ecuaciones de búsqueda para cada componente del PIOC se presentan en la Tabla I.

TABLA I  
 CONJUNTO DE PALABRAS PIOC CONCATENADAS

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Problema     | Sewage OR Effluent OR “Waste water” OR “Black water” OR “Textile effluent” OR “Water load” OR “Industrial waste” OR Discharge                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Intervención | “Enzymatic treatment” OR Enzymes OR “Enzymatic method” OR Chitosan OR Amylase OR Alpha-Amylase OR “Immobilized enzyme” OR Biocatalyst OR “Enzyme activity” OR “Enzyme binding” OR Enzymology OR “Enzyme immobilization” OR “Enzyme kinetics” OR “Enzyme stability” OR “Enzyme substrate” OR Nanocatalysts OR Nanofabrication OR laccase OR “Enzyme synthesis” OR “Laccase mediator system” OR “Enzymatic catalysis” OR “Microbial enzyme” |
| Objetivo     | “Optimisation of wastewater treatment” OR “Water purification” OR “Wastewater treatment optimization” OR “Waste water treatment plant” OR “Water management” OR “Waste water management” OR “Effluent treatment” OR “Toxicity reduction” OR                                                                                                                                                                                               |

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | “Reduction of waste water toxicity” OR “Waste water toxicity reduction” OR “Wastewater toxicity reduction” OR Biodegradation OR Electrocoagulation OR Hybridization OR “Textile effluent treatment” OR “Waste treatment” OR “Effluent decolorization” OR “Dye bioremediation” |
| Contexto | “Textile industry” OR “Textile sector” OR Textile OR “Textile dyes” OR “dye bath” OR Decolourization OR “Synthetic textile dye” OR Dyeing OR Laundry OR Launderette OR “Finishing area” OR Pre-treatment OR Pretreatment OR “Industrial laundry”                              |

Se decidió utilizar la base de datos Scopus como parte de esta revisión sistemática de la literatura (RSL). Esta amplia base de datos bibliográfica creada por Elsevier abarca una extensa gama de disciplinas académicas, lo que la convierte en un soporte adecuado para determinar estudios sobresalientes del tema de investigación. Su objetivo es proporcionar acceso a información actualizada y de la mejor calidad. Scopus es ampliamente utilizado por investigadores, organizaciones y académicos para apoyar la investigación y ayudar en la toma de decisiones científicas.

A. Criterios de inclusión y exclusión

A partir de la pregunta de investigación propuesta, se establecieron parámetros para la recopilación de artículos en la Tabla II y III.

TABLA II  
 CRITERIOS DE INCLUSIÓN

|      |                                                                                                                                           |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CI1: | Los estudios deben incluir aplicación del método enzimático para el tratamiento en las aguas residuales.                                  |
| CI2: | Los estudios deben incluir los tipos de enzimas que se utilizaron para el tratamiento de aguas residuales.                                |
| CI3: | Los estudios incluidos reportaron resultados estadísticos de la aplicación del método enzimático para el tratamiento de aguas residuales. |
| CI4: | Los estudios se han realizado en plantas textiles de tintorería, lavandería, pretratamientos y acabados.                                  |

De acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión se definió el alcance del estudio y el respaldo de la importancia de la información recopilada.

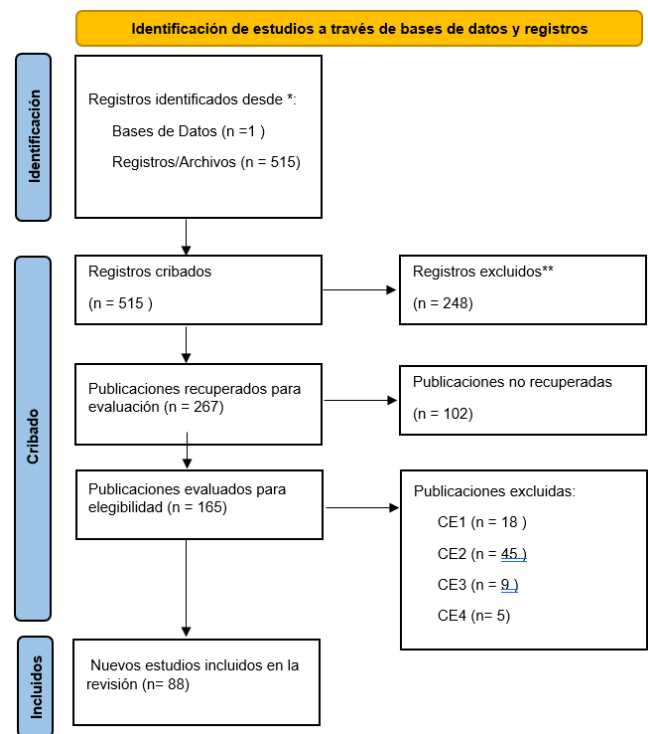
TABLA III  
 CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

|      |                                                                                  |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|
| CE1: | Estudios que se desarrollaron en laboratorios o entornos de simulación o prueba. |
| CE2: | Estudios que han aplicado métodos distintos al enzimático.                       |
| CE3: | Estudios que desarrollaron exclusivamente el comportamiento de las enzimas.      |
| CE4: | Estudios que se han realizado en otros sectores distintos a la industria textil. |

B. Proceso de selección de datos

Como se muestra en la Fig. 1, se empleó el flujograma PRISMA para escoger artículos de interés para la investigación. Se buscaron artículos publicados en inglés y español en la base de datos de SCOPUS, se aplicó la temporalidad desde el 2019 al 2024. Adicionalmente, se realizó la ecuación de palabras clave (Sewage OR Effluent OR “Waste water” OR “Black water” OR “Textile effluent” OR “Water load” OR “Industrial waste” OR Discharge) AND

("Enzymatic treatment" OR Enzymes OR "Enzymatic method" OR Chitosan OR Amylase OR Alpha-Amylase OR "Immobilized enzyme" OR Biocatalyst OR "Enzyme activity" OR "Enzyme binding" OR Enzymology OR "Enzyme immobilization" OR "Enzyme kinetics" OR "Enzyme stability" OR "Enzyme substrate" OR Nanocatalysts OR Nanofabrication OR laccase OR "Enzyme synthesis" OR "Laccase mediator system" OR "Enzymatic catalysis" OR "Microbial enzyme") AND ("Optimisation of wastewater treatment" OR "Water purification" OR "Wastewater treatment optimization" OR "Waste water treatment plant" OR "Water management" OR "Waste water management" OR "Effluent treatment" OR "Toxicity reduction" OR "Reduction of waste water toxicity" OR "Waste water toxicity reduction" OR "Wastewater toxicity reduction" OR Biodegradation OR Electrocoagulation OR Hybridization OR "Textile effluent treatment" OR "Waste treatment" OR "Effluent decolorization" OR "Dye bioremediation") AND ("Textile industry" OR "Textile sector" OR Textile OR "Textile dyes" OR "dye bath" OR Decolourization OR "Synthetic textile dye" OR Dyeing OR Laundry OR Launderette OR "Finishing area" OR Pre-treatment OR Pretreatment OR "Industrial laundry"), dando como resultado 515 publicaciones. A partir del análisis, primero se confirmó que no existían duplicados de artículos, a continuación, se excluyeron publicaciones referentes al título y/o resumen donde resultaron que 248 no estaban en relación con el tema de investigación y quedaron 267 artículos. Luego, se descartó 102 publicaciones, ya que no estaban disponibles por completo en PDF o HTML, resultando 165 publicaciones a elegir. Finalmente, se aplicó criterios de exclusión con los cuales se disminuyó 18 para el criterio 1, 45 para el criterio 2, 9 para el criterio 3 y 5 para el criterio 4, se continuó con una verificación del texto completo y se alcanzó por último 88 artículos que conformaran la RSL.



Flujograma PRISMA

Fig. 1 Proceso de selección de datos en flujograma PRISMA.

Los temas consultados se encuentran más frecuente en las áreas de lavado y acabado de textiles, tintura y preparación de teñidos y principalmente el tratamiento de efluentes textiles. Además, las revistas donde mayormente se encuentran los temas consultados son Chemosphere, Ecotoxicology and Environmental Safety, Biochemical Engineering Journal, Journal of Environmental Management, que nos proporciona información teórica, práctica y actualizada con respecto a nuestro artículo de investigación.

### III. RESULTADOS

De las 88 referencias seleccionadas, responderemos a las preguntas de investigación (RQ1, RQ2, RQ3, RQ4) más sus sub-preguntas (RQ1, RQ2, RQ3, RQ4). Las sub-preguntas formuladas dentro de cada RQ se muestran en las tablas IV, V, VI y VII.

TABLA IV  
PREGUNTAS Y SUBPREGUNTAS

| RQ                                                                    | Sub-preguntas                                                                 | Contribuciones                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RQ1:<br>¿Cómo se aplicó el método enzimático en las aguas residuales? | ¿Cómo se define el método enzimático para el tratamiento de aguas residuales? | Es un tipo de método biológico donde se emplean enzimas para la decoloración, degradación, eliminación de ciertos sustratos, en este caso la mayoría colorantes presentes en las aguas residuales del sector textil, generando así un tratamiento más eco amigable, económico y sostenible [ 9]. |
|                                                                       | ¿Cuál es la importancia de aplicar el método                                  | Algunos de los aspectos más importantes con respecto a los métodos convencionales es el grado de eficiencia, ser más económicos, no generan                                                                                                                                                      |

|  |                                                                                      |                                                                                                                                    |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | enzimático en comparación con otros tratamientos convencionales en aguas residuales? | residuos tóxicos, se aprovecha al máximo la propiedad enzimática que posee cada tipo de especie en condiciones extremas. [11, 29]. |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

La aplicación del método enzimático se llevó a cabo en los efluentes textiles. Por un lado, son más económicos que los métodos físicos; por otro lado, con respecto a los métodos químicos resultan ser más ecológicos y, en conclusión, los vuelve más eficientes debido a que las enzimas por su naturaleza biológica están presentes en todo ser vivo, pueden degradar sustratos como el colorante presente en las aguas residuales textiles y son sostenibles [64]. A continuación, de los 88 artículos revisados, 40 de ellos nos muestra cuatro aspectos importantes de la aplicación del método enzimático como se muestra en la Fig. 2.

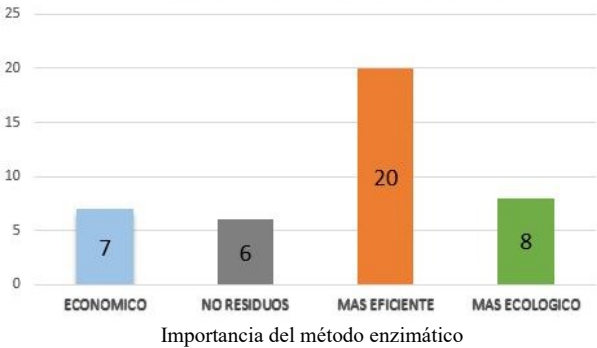


Fig. 2 Gráfico de barras de la importancia del método enzimático.

TABLA V  
PREGUNTAS Y SUBPREGUNTAS

| RQ                                                                         | Sub-preguntas                                                                                                                            | Contribuciones                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RQ2: ¿Qué enzimas se han aplicado para el tratamiento de aguas residuales? | ¿Qué tipo de enzimas se utilizaron en el tratamiento de las aguas residuales y cómo contribuyeron a la degradación de los contaminantes? | De los artículos revisados, las enzimas más utilizadas para este tipo de tratamiento fueron las lacasas y peroxidasas provenientes de bacterias y hongos, y también se empleó oxireductasas derivados de plantas o animales [28, 42, 50]. |
|                                                                            | ¿Cuáles son las enzimas más eficaces para la eliminación?                                                                                | Las enzimas que más resultados positivos generaron y que por su cantidad se han empleado en diversos artículos de investigación son las que vienen derivadas de bacterias y hongos [10, 29, 42, 49, 78].                                  |

De acuerdo con lo revisado, se verificó que las enzimas provenientes de bacterias y hongos suelen ser más utilizadas debido a que desarrollan sus procesos biológicos en condiciones más extremas, como altas temperaturas o escasez de agua, lo que le convierte en uno de los elementos más sobresalientes [42, 52, 65]. Se asignó un gráfico como se muestra en la Fig. 3, el cual refleja porcentualmente los tipos de origen de enzima que se utilizó para los diferentes artículos revisados.

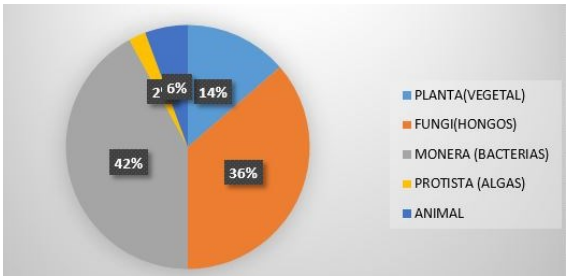


Fig. 3 Gráfico de porcentajes de tipo de origen de enzimas

TABLA VI  
PREGUNTAS Y SUBPREGUNTAS

| RQ                                                                           | Sub-preguntas                                                                                              | Contribuciones                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RQ3: ¿En qué medida se ha optimizado el tratamiento de las aguas residuales? | ¿Cuáles son los resultados obtenidos mediante el uso de este tipo de enzima, en el tratamiento enzimático? | Los resultados mediante el uso de tratamiento enzimático a base de hongo fueron de 94.6 % de decoloración del verde y negro [10], y el uso de bacteria de 81.02% tasa de decoloración para el naranja de metilo [11]. |
|                                                                              | ¿Qué parámetros se deben tener en cuenta para la elaboración de dicho tratamiento enzimático?              | Se deben tener en cuenta las condiciones de temperatura, tiempo, porcentaje de actividad, ph, concentración de colorante [20, 21, 29].                                                                                |

En primer lugar, no solo los parámetros establecidos por temperatura, tiempo y concentración son las únicas condiciones, también necesitan un mediador que les permite aprovechar al máximo su potencial, como un intermediario de la inmovilización, estabilización o agregar nanopartículas como impulsores [57, 59, 80]. El uso de enzimas de origen de planta y animal se han empleado en diferente proceso de decoloración, sobre todo en ciertos colorantes como los reactivos, logrando resultados de 88% en rojo reactivo RR120 [73]. Lo cual resulta eficiente solo para ese tipo de colorante, mientras que las enzimas de bacteria y hongos pueden decolorar colorantes mucho más agresivos como los azoicos [66], no solo los colorantes azoicos, también los sintéticos y la diversa gama de colorantes presentes como el rojo Congo, verde malaquita, o naranja metilo [84]. A continuación, en la Fig. 4 se muestra un gráfico de los colorantes que se han investigado con respecto a los artículos revisados.

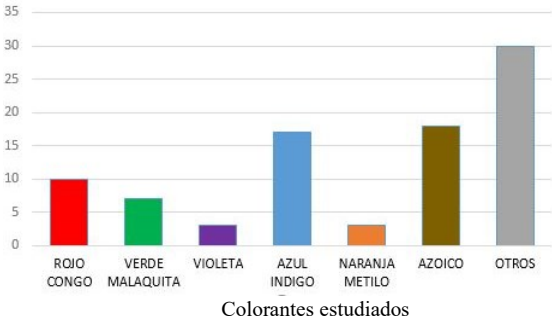


Fig. 4 Diagrama de barras de colorantes estudiados

TABLA VII

#### PREGUNTAS Y SUBPREGUNTAS

|                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RQ4: ¿En qué áreas del sector textil se ha investigado? | La mayoría de las investigaciones se han realizado en el área de tintorería, debido a la variedad de colorantes que se utilizan para teñir [8-13, 15, 38, 40]. Por otro lado, también se desarrolló estudios en el área de Pretratamiento y laboratorio textil [14]. |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

En el sector textil hay varias áreas importantes, cada una enfocada en distintas etapas de la cadena productiva o de servicios, en este caso para el artículo de investigación se da énfasis en aquellas áreas donde se utiliza el agua como recurso indispensable para su uso en producción, estos departamentos son laboratorio textil, lavandería, pretratamiento, y tintorería, siendo este último el de mayor uso de agua y colorantes. A continuación, en la Fig. 5 se muestra un gráfico donde se ve que el mayor porcentaje de estudio se realizó en el sector de tintorería.

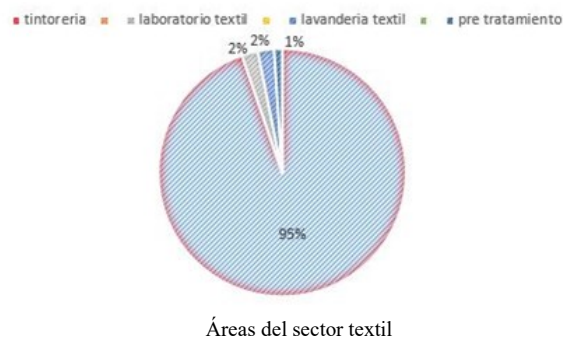


Fig. 5 Gráfico de porcentajes de estudio de áreas del sector textil

#### IV. DISCUSIÓN

En el presente artículo de revisión, se mostró que el método enzimático se aplicó como técnica de remediación para la desintoxicación y decoloración en las aguas residuales de la industria textil [29]. A través de este procedimiento de remediación, se mejoró significativamente los resultados de biodegradación, brindando así una alternativa ecológica a los métodos fisicoquímicos [34].

Además, el método fisicoquímico es relativamente ineficiente y costoso debido a que genera residuos tóxicos, mientras que el método enzimático resulta más eficaz y económico puesto que degrada los desperdicios nocivos ocasionando así un impacto ecológico y sostenible [10, 11].

En esta investigación se encontró el uso de una amplia variedad de enzimas provenientes de diferentes organismos, como animales, plantas, bacterias y hongos, ofreciendo así resultados significativos con respecto a la eliminación de colorantes en las aguas residuales del sector textil [29, 31].

Sin embargo, el uso de enzimas provenientes de bacterias y hongos son los que se usan más recurrentemente y por lo tanto son los más eficientes, debido a que estas especies crecen en ambientes muy hostiles y extremos, logrando así una estructura interna mucho más competente y eficaz para contrarrestar a los colorantes más agresivos como los azoicos [29, 33, 38-41].

De acuerdo con diversas fuentes, mencionaron que los resultados con mayor porcentaje de decoloración son los procedimientos aplicados con enzimas de bacterias que tienen como alcance al 80% de eliminación y provenientes de hongos al 90% a comparación con enzimas derivadas de animales y plantas que aproximadamente resultan en 50% [48, 60, 61].

También, se encontró que el proceso de decoloración depende de la composición del colorante, es decir, para degradar colorantes reactivos se necesitan enzimas provenientes de animales y plantas. Por otro lado, para colorantes más agresivos como los azoicos, se necesitan provenientes de hongos y bacterias que poseen un mayor nivel de descomposición [74, 78].

En este estudio se identificó que las áreas en las cuales se aplicaron los tratamientos enzimáticos son tintorería, laboratorio textil, lavandería y pretratamiento, donde se utilizaron colorantes, soda caustica, ácido acético, etc., los cuales son altamente contaminantes [14, 39, 83].

Asimismo, el área que más ha sido investigado es tintorería, ya que se utilizan diferentes colorantes como disperso, azoicos, etc., que genera un mayor nivel de toxicidad y de mayor dificultad de remediación [20].

#### V. CONCLUSIÓN

Con la presente investigación se ha logrado alcanzar el objetivo principal de dar a conocer que la aplicación del método enzimático en las aguas residuales de la industria textil obtiene mejores resultados en la degradación de químicos, en especial de colorantes. Ensayos prueban que el uso de enzimas provenientes de animales, plantas, hongos y bacterias para la remediación de colorantes es más eficiente y ecológico tanto como económico.

Además, la decoloración depende del tipo de enzima y de colorante, ya que diversos colorantes tienen características que poseen más afinidad con determinadas enzimas, esto quiere decir que pueden degradarse y generar un resultado de menor toxicidad. Por esta razón, la mayor aplicación de estas enzimas es en el área de tintorería textil en comparación a las otras áreas del sector textil.

Por consiguiente, se verificó que existe un alto grado de eficiencia en cuanto a decoloración utilizando enzimas provenientes de hongos y bacterias, ya que presentan mayor versatilidad metabólica y rápida capacidad de adaptación y evolución. Por el contrario, la capacidad de las provenientes de plantas y animales es más limitada.

De acuerdo con las fuentes revisadas, el área de mayor investigación ha sido el de tintorería textil debido a que en este sector se utiliza una gran variedad de colorantes que contaminan el medio acuático. Sin embargo, en el área de pretratamientos y acabados son de menor impacto y poca aplicación debido a su baja contaminación.

Finalmente, las plantas de tintorería textil deberían implementar el uso del método enzimático para el tratamiento de sus aguas residuales, porque es amigable con el medio ambiente, reduce los residuos tóxicos casi en su totalidad y

garantiza un cambio ecológico. Estos beneficios ayudan a reducir el impacto climático debido a la reutilización del agua fomentando la sostenibilidad y demostrando la capacidad degradante de las enzimas. Para lograr un mayor grado de eficiencia en la aplicación de enzimas, es necesario el uso de mediadores, por ejemplo, electros coaguladores, proceso de hibridación, estabilidad térmica, inmovilización, etc. Estos intermediarios actúan junto con las enzimas, logrando maximizar sus beneficios.

## REFERENCES

- [1] Rashwan, A., Younis, H., Abdelshafy, A., Osman, A., Eletmany, M., Hafouda, M. y Chen, W. "Plant starch extraction, modification, and green applications: a review." *Environmental Chemistry Letters*, 22, 2483-2530. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01753-z>
- [2] N. Gupta, J. Shankar y S. Kumar, "Chitosan decorated magnetic nanobiocatalyst of *Bacillus* derived  $\alpha$ -amylase as a role model for starch wastewater treatment, detergent additive and textile desizer", *Bioorganic Chemistry*, Vol. 151. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2024.107673>.
- [3] B. Rana y J. Chakraborty. "Laccase mediator system as a potential technology for decolorization of textile dyes — Overview and perspectives", *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, Vol. 49, pp. 257-270, jun. 2024. doi: 10.56042/ijfr.v49i2.11732
- [4] N. Ilić, J. Filipović, M. Milić, K. Mihajlovski, "Harnessing the hidden environmental power of *Bjerkandera adusta* laccase: Sustainable production, green immobilization, and eco-friendly decolorization of mixed azo dyes", *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Vol. 42. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101747>.
- [5] A. Sharjeel, K. Sana, K. Muhammad, N. Yasir y R." Shagufta. "Comparison between BOD and COD of auxiliaries used in conventional and enzymatic pretreatment of textiles polluting the aquatic environment." *Chemical Papers*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11696-024-03632-x>
- [6] Ó. Beltrán. "Revisión sistemática de la literatura". *Colombiana de Gastroenterología*, pp. 60-69, 2005. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcg/v20n1/v20n1a09.pdf>
- [7] J. PT Higgins y S. Green, «Manual Cochrane de revisiones sistemáticas de intervenciones,» Manual Cochrane 5.1.0, 2011. [https://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/uploads/Manual\\_Cochrane\\_510\\_reduit.pdf](https://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/uploads/Manual_Cochrane_510_reduit.pdf)
- [9] Zhang Qingyun, Chen Lijia, Xie Xuehui, Qin Yiting, Xu Dayong, Zhang Xiaoying, Liu Xiaoyue, Liu Na. "Molecular mechanism triggered by cometabolic biodegradation of azo dyestuff by *Klebsiella* sp. KL-1: Based on enzymatic and proteomic responsiveness". *Journal of Water Process Engineering*. 10.1016/j.jwpe.2024.105339
- [10] Daniela Bucchieri, Marco Mangiagalli, Francesca Martani, Pietro Butti, Marina Lotti, Immacolata Serra and Paola Brandu. "A novel laccase from *Trametes polyzona* with high performance in the decolorization of textile dyes". *AMB Express*. 10.1186/s13568-024-01687-3
- [11] Pandey, Akanksha; Pathak, Vinay Mohan; Navneet y Rajput, Minakshi. "Un enfoque viable para la degradación del colorante azoico (naranja de metilo) mediante el aislado de efluente textil *Serratia marcescens*, cepa ED1, para la sostenibilidad del agua: identificación de AST, optimización de la degradación e hipótesis de la vía". *Heliyon*. 10.1016/j.heliyon.2024.e32339
- [13] Van Brenk, Brigit; Kruidhof, Leodie; Kemperman, Antoine; Van der Meer, Walter y Wösten, Han. "Discoloration of textile dyes by spent mushroom substrate of *Agaricus bisporus*". *Bioresource Technology*. 10.1016/j.biortech.2024.130807.
- [14] Semião Matheus Araújo, Haminiuk Charles, Windson Isidoro, Brugnari Tatiane, Mannes Yorrannys, Nagata, Wanessa Algarte Ramsdorf, Maciel, Giselle Maria. "Synergistic treatment of textile wastewaters using spent diatomaceous earth loaded with laccases: A cost-effective and eco-friendly approach". *Journal of Water Process Engineering*. 10.1016/j.jwpe.2023.104552.
- [15] Zouari-Mechichi, Héla; Benali, Jihen; Alessa, Abdulrahman; Hadrich, Bilel y Mechichi, Tahar. "Decoloración eficiente del colorante poliazóico gris sirio mediante el sistema de lacasa-mediador de *Coriopsis gallica*: optimización del proceso y evaluación de la toxicidad". 10.3390/molecules29020477.
- [16] Ghulam Mustafa, Muhammad Tariq Zahid, Mayur Bharat Kurade, Swapnil Mahadeo Patil, Farah Rauf Shakoori, Zeeshan Shafiq, Sidra Ihsan, Yongtae Ahn, Azmat Ali Khan, Amel Gacem, Byong-hun Jeon. "Molecular characterization of azoreductase and its potential for the decolorization of Remazol Red R and Acid Blue 29". *Environmental Pollution*. 10.1016/j.envpol.2023.122253
- [19] Mohamed E. El Awady, Fatma N. El-Shall, Ghada E. Mohamed, Ahmed M. Abd-Elaziz, Mohamed O. Abdel-Monem y Mervat G. Hassan. "Exploración de la eficiencia de decoloración y los mecanismos de biodegradación de diferentes colorantes azoicos textiles funcionales por *Streptomyces albidoflavus* 3MGH". *BMC Microbiology*. 10.1186/s12866-024-03347-9.
- [20] Abrar Hussain Mian, Sadia Qayyum, Samia Zeb, Tehreem Fátima, Kashmala Jameel, Bushra Rehman. "Exploración de aislamientos fúngicos autóctonos para una degradación eficiente de colorantes: un estudio exhaustivo sobre la biorremediación sostenible en el medio ambiente total". *Environmental Technology & Innovation*. 10.1016/j.eti.2024.103615
- [21] Adigüzel, Ali; Yabalak, Erdal; Cilmeli, Sümeyye; Durgun, Recep y Kaya, Nisa. "Peroxidasa robusta de *Bacillus mojavensis* TH309: inmovilización sobre hidrocarbón de cáscara de nuez y evaluación de su potencial en la decoloración de tintes". *International Journal of Biological Macromolecules*. 10.1016/j.ijbiomac.2024.134525.
- [27] Chopra y Navleen Kaur y Sondhi, Sonica. "Biodegradación del colorante índigo carmín por lacasa de *Bacillus licheniformis* NS2324". *Revista de Ciencias de la Vida de Defensa*. 10.14229/dljs.7.18040.
- [28] Umme Kalsoom, Nasira Khalid, Affaf Ibrahim, Syed Salman Ashraf, Haq Nawaz Bhatti, Zainab Ahsan, Jakub Zdarta, Muhammad Bilal. "Degradación biocatalítica de los colorantes azul reactivo 221 y azul directo 297 por peroxidasa de rábano picante inmovilizada en nanopartículas de óxido de hierro con características cinéticas y termodinámicas mejoradas". *Chemosphere*. 10.1016/j.chemosphere.2022.137095.
- [29] George, Jenet; Rajendran, Devi; Senthil, Kumar; Sonai, Srinidhi; Vinoth, Vaidyanathan y Rangasamy, Gayathri. "Decoloración y desintoxicación eficiente de colorantes triarilmetano y azoicos mediante agregados enzimáticos reticulados porosos de lacasa de *Pleurotus ostreatus*". *Chemosphere*. 10.1016/j.chemosphere.2022.137612.
- [31] Thoa, Le Thi Kim; Thao, Trinh Thi Phuong; Nguyen-Thi, My-Le; CHung, Nguyen; Ooi, Chien; Park, Seung-Moon; Lan, Tran; Quang, Hoang y Khoo, Kuan. "Biodegradación microbiana de colorantes sintéticos recalcitrantes de aguas residuales enriquecidas con textiles por *Fusarium oxysporum*". *Chemosphere*. 10.1016/j.chemosphere.2023.138392.
- [33] Dahiya, Manju, Islam, Dar Tafazul, Srivastava, Preeti y Sreekrishnan TR. "Desintoxicación y decoloración de efluentes textiles complejos en un reactor de membrana enzimática: estudios discontinuos y continuos". *Frontiers in Microbiology*. 10.3389/fmicb.2023.1193875
- [34] Shweta Kalra, Vivek Dalvi, Vivek Kumar Nair, Saurabh Samuchiwal, Anushree Malik. "Tratamiento híbrido mediado por electrocoagulación y lacasa para la decoloración eficiente de efluentes generados en industrias textiles". *Environmental Research*. 10.1016/j.envres.2023.115868.
- [35] Himanshu; Chamoli, Shivangi; Singh, Amrita; Kapoor, Rajeev Kumar; Singh, Surender; Singh R.K. y Saini, Jitendra Kumar. "Purificación y caracterización de lacasa de *Ganoderma lucidum* y su aplicación en la decoloración del colorante verde malaquita". *Informes sobre tecnología de biorecursos*. 10.1016/j.biteb.2023.101368
- [38] Pandey, Deepshikha; Daverey, Achlesh; Dutta, Kasturi; Dutta K. y Arunachalam, Kusum. "Eliminación de tintes de efluentes textiles simulados y reales utilizando lacasa inmovilizada en biocarbón de agujas de pino". *Revista de ingeniería de procesos de agua*. 10.1016/j.jwpe.2023.103710.
- [40] Ambika; Kumar, Vijay; Jamwal, Aanchal; Kumar, Virender y Singh, Dharam. "Bioproceso verde para la degradación de mezclas de colorantes sintéticos utilizando un consorcio de bacterias productoras de lacasas de nichos del Himalaya". *Journal of Environmental Management*. 10.1016/j.jenvman.2022.114764.
- [41] Mahmood, Raja Tahir. Asad, Muhammad Javaid, Asgher, Muhammad, Khan, Falak Sher, Muzammil, Khursheed, Nasir, Nazim, Anwar, Pervez, Awais, Muhammad. "Primer informe sobre la biorremediación de efluentes industriales textiles por *Piptoporus Betulinus* IEBL-3 mediante el

uso de la metodología de superficie de respuesta". *Applied Sciences* (Switzerland). 10.3390/app12031090

[42] Raja, Angel Grace; Selva Arasu, Kalai Arasi y Rajaram, Rajakumari. "Síntesis, caracterización y aplicación del nanocompuesto de quitosano-TPP-ZnO para el tratamiento eficiente de efluentes que contienen colorante de azufre". *Materials Today: Proceedings*. 10.1016/j.matpr.2022.07.426

[44] Si, Jing; Wu, Yi; Ma, Hong-Fei; Cao, Yong-Jia; Sun, Yi-Fei y Cui, Bao-Kai. "Selección de una lacasa de *Ganoderma australe* estable al pH y a la temperatura y su aplicación para la biorremediación de tintes textiles". *Journal of Environmental Management*. 10.1016/j.jenvman.2021.113619.

[45] Svetozarević M, Šekuljica N., Dajić A., Mihajlović M., Popovski Z., Mijin D. "Reticulación de la peroxidasa: de la valorización de la cáscara de patata al tratamiento de efluentes coloreados". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 10.1088/1755-1315/1123/1/012005.

[48] Kadam, Suhas K.; Tamboli, Asif S.; Chandanshive, Vishal V.; Govindwar, Sanjay P.; Choo, Yeon-Sik y Pak, Jae Hong. "Construcción e implementación de un parque acuático flotante como humedal construido eficaz para el tratamiento de aguas residuales industriales textiles". *Revista de materiales peligrosos*. 10.1016/j.jhazmat.2021.127710.

[49] Mao, Guotao, Wang, Kai, Wang, Fangyuan, Li, Hao, Zhang, Hongsen, Xie, Hui, Wang, Zhimin, Wang, Fengqin, Song, Andong. "Una lacasa termoestable diseñada con gran capacidad para decolorar y desintoxicar la verde malaquita". *International Journal of Molecular Sciences*. 10.3390/ijms222111755.

[50] Liu, Jiashu; Chen, Jianhui; Zuo, Kangjia; Li, Huanan; Peng, Fang; Ran, Qiuping; Wang, Rui; Jiang, Zhengbing; Song, Huiting. "El estrés oxidativo inducido químicamente mejoró la degradación y desintoxicación de los colorantes sintéticos mediada por lacasa bacteriana.". *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 10.1016/j.ecoenv.2021.112823

[52] Khaled, Jamal M.; Alyahya, Sami A.; Govindan, Rajivgandhi; Chelliah, Chenith Kanisha; Maruthupandy, Muthuchamy; Alharbi, Naiyf S.; Kadaikunnan, Shine; Issac, Reya; Murugan, Sevanan y Li, Wen-Jun. "Las bacterias productoras de lacasa influyeron en la alta decoloración de los colorantes azoicos textiles con un estudio avanzado". *Environmental Research*. 10.1016/j.envres.2021.112211.

[55] De Paula, Nigella Mendes; da Silva, Krisle; Brugnari, Tatiane; Haminiuk, Charles Windson Isidoro; Maciel, Giselle Maria. "Potencial biotecnológico de hongos de un ecosistema de manglar: enzimas, tolerancia a la sal y decoloración de un efluente textil real". *Microbiological Research*. 10.1016/j.micres.2021.126899

[57] Popović, Nikolina; Pržulj, Dunja; Mladenović, Maja; Prodanović, Olivera; Ece, Selin; Ilić Đurđić, Karla; Ostafe, Raluca; Fischer, Rainer; Prodanović, Radivoje. "Inmovilización de paredes celulares de levadura con lacasa de superficie expuesta de *Streptomyces cyaneus* dentro de perlas de dopamina-alginato para decoloración de tintes". *International Journal of Biological Macromolecules*. 10.1016/j.ijbiomac.2021.04.115

[60] Jesús D. Rueda-Villabona, Andrés M. Rueda, Olga L. Saavedra, Inés Hernández, Giovanna Rincón, Ruth Aralí Martínez-Vega, Clara I. Sánchez. "Extracto enzimático crudo de *Dictyopanus pusillus* LMB4 como herramienta biotecnológica para la biodegradación por violeta cristal". *Bioresource Technology Reports*. 10.1016/j.biteb.2021.100723.

[61] Amin, Shivani; Rastogi, Rajesh Prasad; Chaubey, Mukesh Ghanshyam; Jain, Kunal; Divecha, Jyoti; Desai, Chirayu y Madamwar, Datta. "Análisis de la degradación y toxicidad de un colorante textil reactivo Diazo-Direct Red 81 por el recién aislado *Bacillus* sp. DMS2". *Frontiers in Microbiology*. 10.3389/fmicb.2020.576680.

[64] Ajay Kumar Chauha, Bijan Choudhury. "Degradación de colorantes sintéticos mediante enzimas lignolíticas producidas a partir de la cepa ABC\_IITR de *Halopiger aswanensis* mediante fermentación en estado sólido". *Chemosphere*. 10.1016/j.chemosphere.2021.129671

[65] Motamedi, Elaheh; Kavousi, Kaveh; Sadeghian Motahar, Seydeh Fatemeh; Reza Ghaffari, Mohammad; Sheykh Abdollahzadeh Mamaghani, Atefeh; Hosseini Salekdeh, Ghasem y Ariaenejad, Shohreh. "Eliminación eficiente de diversos tintes textiles de aguas residuales mediante una nueva lacasa termohalotolerante". *Bioresource Technology*. 10.1016/j.biortech.2021.125468.

[66] Guang Guo, Chong Liu, Jiuxiao Hao, Fang Tian, Keqiang Ding. "Desarrollo y caracterización de un consorcio bacteriano halo-termofílico para la decoloración de colorantes azoicos". *Quimiosfera*. 10.1016/j.chemosphere.2021.129916

[68] Zofair, Syeda Fauzia Farheen; Arsalan, Abdullah; Khan, Masood Alam; Alhumaydhi, Fahad Abdulrahman; Younus, Hina. "Inmovilización de lacasa sobre soporte de anticuerpo ligado a sefaroza para la decoloración del rojo fenol". *International Journal of Biological Macromolecules*. 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.009.

[69] Yaru Zhang, Jing Ren, Quan Wang, Rey Shuxiang, Shuna Li, Hong Ya Li. "Características de oxidación y potencial de degradación de una peroxidasa decolorante de tinte de *Bacillus amyloliquefaciens* para el tinte violeta cristal". *Biochemical Engineering Journal*. 10.1016/j.bej.2021.107930.

[73] Mohammed, Ibrahim Awad; Jawad, Ali H.; Abdulhameed, Ahmed Saud; Mastuli y Mohd Sufri. "Modificación fisicoquímica del quitosano con cenizas volantes y tripolifosfato para la eliminación del colorante reactivo rojo 120: optimización estadística y estudio de mecanismos". *International Journal of Biological Macromolecules*. 10.1016/j.ijbiomac.2020.06.069

[74] Rui MF Bento, Mafalda R. Almeida, Pankaj Bharmoria, Mara G. Freire, Ana PM Tavares. "Mejoras en la degradación enzimática de colorantes textiles utilizando surfactantes basados en líquidos iónicos". *Separation and Purification Technology*. 10.1016/j.seppur.2019.116191.

[76] Tatoba R. Waghmode, Mayur B. Kurade, Ramchandra T. Sapkal, Chandrakant H. Bhosale, Byong-Hun Jeon, Sanjay P. Govindwar. "Fotocatálisis secuencial y tratamiento biológico para la degradación mejorada del colorante azoico persistente rojo de metilo". *Journal of Hazardous Materials*. 10.1016/j.jhazmat.2019.03.004.

[78] Al-Tohamy, Rania, Kenawy, El-Refaie, Sun, Jianzhong J, Ali, Sameh Samir. "Rendimiento de una cepa de levadura tolerante a la sal recientemente aislada, *Sterigmatomyces halophilus* SSA-1575, para la decoloración y desintoxicación de colorantes azoicos". *Frontiers in Microbiology*. 10.3389/fmicb.2020.01163

[84] Muruganandham Thanavel, Paul O. Bankole, Suhas Kadam, Sanjay P. Govindwar, Senthil Kumar Sadasivam y. "Desulfonación del colorante azoico textil Acid Fast Yellow MR por la recién aislada *Aeromonas hydrophila* SK16". *Water Resources and Industry*. 10.1016/j.wri.2019.100116.