

Biorremediación de agua residual contaminada con el colorante negro ácido 194, proveniente de una industria textil de Caldas, utilizando complejos enzimáticos y *Fusarium oxysporum*

Bioremediation of wastewater with acid black 194 dye from a textile industry of Caldas using enzymatic complexes and *Fusarium oxysporum*

DIEGO MAURICIO HOLGUIN CASTELLANOS, VALERIA GIRALDO CUARTAS, DIANA MARCELA OCAMPO SERNA, JUAN DAVID RIVERA GIRALDO Y YANED MILENA CORREA NAVARRO

¹Grupo Estudios Ambientales en Agua y Suelo, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas.

Resumen

La industria textil causa la contaminación del agua ya que produce diversidad de residuos líquidos. Esta agua residual contiene colorantes y productos químicos tóxicos que tienen un impacto negativo en la calidad del agua y la vida acuática. Adicionalmente, estos residuos son difíciles de degradar, pueden persistir durante décadas y afectar el ambiente y la salud humana. Con el objetivo de abordar esta problemática, este estudio evaluó la eficacia de dos complejos enzimáticos (C y E) y el hongo *Fusarium oxysporum* como tratamientos de biorremediación para el agua residual proveniente de una industria textil, contaminada con negro ácido 194 (AB194). Los resultados evidenciaron que los complejos enzimáticos y el hongo *F. oxysporum* tienen capacidad para degradar el colorante en las muestras de agua trabajadas. Estos hallazgos sugieren que estos tratamientos pueden ser una alternativa sostenible para la biorremediación de agua contaminada con colorantes, derivadas de la industria textil.

Palabras claves: Industria textil, degradación de contaminantes, alternativa sostenible, colorantes industriales, DQO.

Abstract The textile industry is a cause of water pollution as it produces large amounts of liquid waste. These wastewaters contain toxic chemicals and dyes that have a negative impact on water quality and aquatic life, and are difficult to degrade, persisting for decades and affecting the environment and human health. To address this issue, this study evaluated the effectiveness of two enzyme complexes (C and E) and the fungus *Fusarium oxysporum* as bioremediation treatment for textile industry wastewater contaminated with acid black 194 (AB194). The results show that both enzyme complexes and *F. oxysporum* have the ability to degrade the dye in wastewater samples. These findings suggest that these treatments may be a sustainable alternative for the bioremediation of wastewater contaminated with textile industry dyes.

Keywords; Textile industry, contaminant degradation, sustainable alternative, industrial dyes, COD.

Introducción

La industria textil es una de las más importantes del mundo y emplea una gran cantidad de compuestos químicos. Uno de estos productos son los colorantes sintéticos, los cuales se utilizan en el proceso de teñido de las telas. Aunque estos tintes han mejorado la calidad y la estética de los textiles, también han generado un problema ambiental debido a que entre el 10% y el 15% de los tintes empleados en las industrias textiles, de curtidos, papelera, plástica, alimentaria, cosmética y farmacéutica, se vierten al agua residual durante las maniobras de teñido, lo que ha generado contaminación [1].

El grupo más relevante de colorantes sintéticos en términos de toxicidad son los colorantes azoicos, cuyos compuestos originales y/o sus subproductos de degradación han demostrado poseer propiedades mutagénicas y cancerígenas para los humanos y otras alteraciones en otras formas de vida [2]. El colorante ácido diazo negro cromo (Negro Ácido 194/AB194), ilustrado en la Figura 1, es uno de los colorantes comerciales más utilizados para teñir diversos materiales, como cuero, lana, poliamida y seda [3]. No obstante, su descarga en cuerpos de agua puede representar un peligro para la salud humana y animal [4].

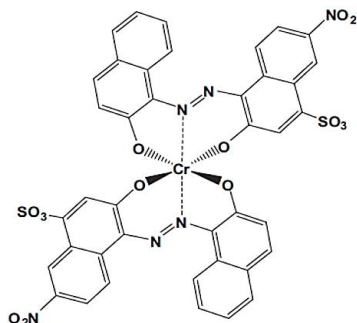


Figura 1. Estructura del colorante cromo ácido diazo 194 (AB194) [4]

Diferentes técnicas se utilizan para enmendar la contaminación generada por los tintes utilizados en la industria textil, una de ellas es la biorremediación. Esta técnica utiliza microorganismos, hongos, plantas o enzimas, con diferentes condiciones experimentales, para alcanzar la biodegradación de los contaminantes trabajados [5].

Estudios previos han demostrado que la degradación de colorantes presentes en agua residual utilizando enzimas, es un enfoque amigable con el ambiente, económico, eficaz y con baja producción de lodos [6]. En este sentido, se ha observado una decoloración de mezclas de colorantes mediante enzimas y se han reportado varios casos de degradación de colorantes azo, trifenilmetano y antraquinona mediante la utilización de enzimas producidas por diferentes hongos [7]. Asimismo, Almaguer y colegas lograron el 98% de la degradación del colorante azo cristal ponceau 6R, al emplear enzimas peroxidadas obtenidas de nabo (*Brassica rapa*) [8]. También se logró la degradación enzimática y la desintoxicación del colorante azo rojo congo, mediante el empleo de una lacasa extraída de *Oudemansiella canarii* [9].

Por otro lado, los hongos han sido evaluados como bioadsorbentes o biodegradadores de colorantes en estudios previos, y se ha demostrado que varios hongos, como *Cunninghamella elegans*, *Trametes versicolor* y *Aspergillus ochraceus*, fueron eficientes en la eliminación de colorantes [10]. Un estudio en el que se utilizó *Fusarium oxysporum* para degradar y detoxificar colorantes textiles azo glicoconjugados (GAD), mostró como después de 6 días de crecimiento en un cultivo líquido discontinuo, el hongo degradó en un 100% el tinte. Posteriormente, en este mismo estudio, se demostró que, con un aumento del inóculo fúngico inicial, el colorante se decoloró totalmente tras 24 h de incubación [11]. En este mismo sentido, otro estudio, evaluó la eliminación del azul de anilina, el negro reactivo 5, el naranja II y el violeta cristal en agua contaminada y evidenció que el hongo *F.*

oxysporum en condiciones óptimas de cultivo, podría degradar alrededor del 85% de estos colorantes sintéticos en concentraciones hasta de 100 mg/l [12]. Estos estudios demuestran que el uso de hongos para la degradación de colorantes es una opción atractiva.

Lo anteriormente expuesto, muestra como el uso de complejos enzimáticos y de microorganismos para la biorremediación, puede ser una estrategia prometedora para tratar agua residual contaminada y así poder subsanar los impactos negativos de la contaminación, causados por los tintes derivados de la industria textil y otras industrias relacionadas.

2. Materiales y métodos

2.1. Químicos y reactivos

Se obtuvo agua residual contaminada con negro ácido 194 (AB194) de una empresa textil ubicada en el eje cafetero. Esta agua fue sometida a un proceso de coagulación-floculación previo a la realización de nuestros ensayos. Estos procesos fueron realizados por el grupo de investigación PRISMA de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Los complejos enzimáticos utilizados en el proceso fueron proporcionados por el laboratorio Ascavi Group, sus características químicas se detallan en la Tabla 1. El hongo *F. oxysporum* utilizado en el estudio fue previamente caracterizado antes de su uso. Para los ensayos de DQO se utilizaron los reactivos de la prueba NANOCOLOR® DQO 1500, de acuerdo con el protocolo de prueba 029.

Tabla 1. Información de los complejos enzimáticos trabajados

Complejos enzimáticos	Enzima	C	E
	Agregación	Blend	Blend
	pH	8,2	4,0
	Comisión	Oxidorreductasa	Oxidorreductasa
	Catálisis referente	Oxidorreductasa	Carboxilasa

2.2. Evaluación de la longitud de onda máxima de absorción del colorante AB194

Se escaneó una muestra de agua residual que contenía colorante AB194 en un espectrofotómetro Spectronic® genesys™ 5 para determinar la longitud de onda máxima de absorción del agua residual. La muestra se colocó en una celda de espectrofotometría y se escaneó en el intervalo de longitud de onda de 400 nm a 800 nm. La longitud de onda máxima de

absorción del colorante se determinó a partir del espectro de absorción obtenido. El valor de la longitud de onda máxima de absorción se utilizó posteriormente en todos los análisis espectrofotométricos [13].

2.3. Ensayo de decoloración enzimática de colorantes

Este estudio se llevó a cabo utilizando los complejos enzimáticos denominados C y E (Tabla 1). El grado de decoloración se analizó midiendo las absorbancias inicial y final de la mezcla de reacción utilizando espectrofotometría UV-Vis. La disolución utilizada en la mezcla de reacción fue preparada tomando un volumen correspondiente del complejo enzimático respectivo y mezclándolo con agua residual en una relación en volumen de 1:100. Después de agitar la disolución de la muestra, se midió la absorbancia a una longitud de onda de 577 nm (correspondiente a una longitud de onda de absorción del agua residual con colorante AB194 después del proceso de coagulación-floculación). Durante la realización del experimento, la mezcla de reacción se mantuvo bajo incubación a una temperatura constante de 20 °C con agitación constante de 180 rpm. El porcentaje de degradación del colorante fue determinado utilizando la Ecuación 1 [13], donde ABS_0 y ABS_f son las absorbancias inicial y final, respectivamente, del colorante.

$$\text{Decoloración de tinte (\%)} = \left(\frac{ABS_0 - ABS_f}{ABS_0} \right) * 100 \quad (1)$$

2.4. Efecto del tiempo de reacción en la degradación del colorante

Se llevó a cabo un ensayo de acuerdo con el protocolo previamente establecido. Se tomó una muestra de 30 ml de agua residual y se trató con 0,3 ml del complejo enzimático. La reacción se mantuvo durante un periodo de 2 h, tomando muestras en diferentes tiempos: 2, 30, 60 y 120 min. Las alícuotas recolectadas permitieron determinar la absorbancia de la mezcla de reacción y calcular el porcentaje de decoloración utilizando la Ecuación 1. El tiempo de reacción óptimo se utilizó para experimentos posteriores y se recolectaron alícuotas de la mezcla de reacción en diferentes tiempos para futuras pruebas. Todo el procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con el método descrito por Chiong et al. (2016) [14].

2.5. Efecto del pH en la degradación del colorante

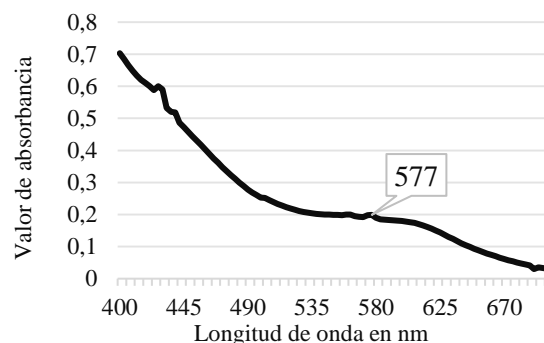
Se realizó un experimento para analizar el efecto del pH en la degradación del colorante mediante reacciones enzimáticas. Se modificó el pH del agua residual en un rango de pH de 4,0 a 12,0, ajustándolo

mediante la adición de NaOH o HCl 0,1 N, según fuera necesario. Se mantuvo el protocolo descrito anteriormente manteniendo la relación 1:100. La reacción se mantuvo durante 2 min y se tomaron alícuotas del tratamiento. Se midieron las absorbancias finales de las mezclas de reacción y se calculó el porcentaje de degradación del colorante [14].

2.6 Pruebas de DQO en tratamientos con complejos enzimáticos

Para llevar a cabo la medición de la demanda química de oxígeno en las muestras, se siguió un protocolo modificado del test 029 de NanoColor® DQO 1500 Test tube 100 - 1500 mg/l O₂ de Macherey Nagel, el cual emplea un espectrofotómetro NanoColor UV-Vis. Para garantizar la precisión de los resultados, se realizaron triplicados de las tomas de absorbancia tanto para los blancos como para las muestras de los tratamientos.

2.7 *F. oxysporum* y condiciones de cultivo



Réplica del *F. oxysporum*: para replicar el microorganismo, se tomó un disco de *F. oxysporum* de aproximadamente 1,0 cm², el cual se transfirió a Agar Papa Dextrosa (PDA) (peptona de papa; glucosa; agar). Los cultivos se mantuvieron en cajas Petri a 32 °C y pH 5,6 ± 0,2 durante cinco días para su uso posterior.

Preparación del inóculo: se transfirieron cinco discos (aproximadamente 1,0 cm² cada uno) de biomasa fúngica para inocular cuatro erlenmeyers que contenían medio PDA líquido. Los erlenmeyers se mantuvieron en agitación constante a 180 rpm durante siete días a temperatura ambiente hasta el momento de su uso, siguiendo el protocolo de Osorio Echavarría *et al.* en 2011 [15].

Análisis cuantitativo de la degradación AB194: con el objetivo de cuantificar la degradación del negro ácido 194 (AB194), se adicionaron 40,0 ml de agua residual a un erlenmeyers de 250 ml que contenían 40,0 ml del hongo *F. oxysporum* previamente cultivado. Este ensayo se llevó a cabo con agitación

constante a 180 rpm durante tres días y se tomaron alícuotas de 3 ml cada 24 h, las cuales se centrifugaron a 3500 rpm durante 15 min. A continuación, se retiró el sobrenadante y se midió la absorbancia a 577 nm. Finalmente, para calcular el porcentaje de decoloración se utilizó la Ecuación 1. El ensayo tuvo como control un cultivo de *F. oxysporum* al que se le adicionó 40,0 ml de agua destilada estéril.

2.8 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante el software libre RStudio versión 1.3.1093 con la finalidad de evaluar el efecto de los tratamientos. Se utilizó la variable respuesta absorbancia. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) en conjunto con una prueba de múltiples rangos de Tukey. Se determinaron los valores correspondientes para cada modelo estadístico, donde se indicaron las condiciones y la significancia estadística mediante el uso de prueba F, y se trabajó con una significancia del 5%.

3. Resultados y discusión.

3.1. Longitud de onda de máxima absorción del colorante AB194 y experimentos de decoloración con el uso de complejos enzimáticos

En este estudio se determinó la longitud de onda máxima de absorción del tinte AB194 en espectro UV-Vis. En la Figura 2, se observa un máximo de absorción en 577 nm, valor que se encuentra dentro del rango esperado para este compuesto [16]. La determinación de esta longitud de onda es importante porque permite analizar la concentración del colorante en una muestra.

Figura 2. Barrido de absorción de espectro UV-Vis desde 400 nm a 700 nm, de la muestra de agua residual contaminada con negro ácido 194

Previamente a la remediación, se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica del agua residual procedente de la industria textil por parte del grupo de investigación PRISMA de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Los resultados de dicha evaluación se presentan en la Tabla 2. En este estudio, los altos niveles de DQO (3270 mg/l) y DBO (648 mg/l) en el agua residual textil, indicaron la toxicidad alta de los efluentes, lo cual es perjudicial para toda la ecología y el sistema acuático del agua trabajada

Tabla 2. Comparación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual con AB194 sin tratamientos y los parámetros fisicoquímicos permisibles establecidos por [17].

Parámetro	Unidades	Limite permisible	ARnD Valor promedio y desviaciones	Métodos (SM)
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	8,21 ± 0,91	4500- H B
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l O ₂	400,00	3270,8 ± 521,2	5220 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/l O ₂	200,00	648,2 ± 140,2	5210 B
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/l	50,00	55,61 ± 34,23	2540 D
Cromo (Cr)	mg/l	0,50	25,88 ± 9,73	311 B

Un alto valor de SST reduce la difusión de la luz solar en el agua, lo cual disminuye el proceso fotosintético en la flora acuática. Este proceso causa además una reducción del valor de oxígeno disuelto del agua, lo que provoca una depuración extremadamente deficiente del agua residual por parte de los microorganismos [18].

El primer experimento de este trabajo se llevó a cabo con el fin de evaluar la capacidad de los complejos enzimáticos C y E para decolorar el agua residual que contenía el tinte AB194. Durante este ensayo, se mantuvo el pH original del agua residual ($8,2 \pm 0,9$). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.

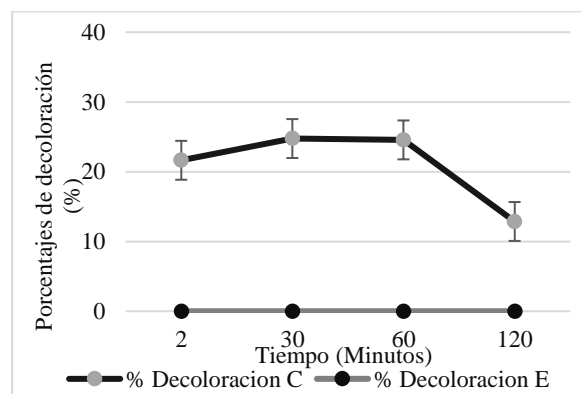


Figura 3. Porcentajes de decoloración del tratamiento del agua residual con AB194 con dos complejos enzimáticos.

En la Figura 3 se observa que el tratamiento con el complejo enzimático C tiene porcentajes de decoloración superiores al 20%, a lo largo del tiempo evaluado, lo que confirma la actividad catalítica de este complejo enzimático. Sin embargo, en estas mismas condiciones, no se observó decoloración en el tratamiento del agua residual con el complejo enzimático E. Es importante destacar que los valores de decoloración obtenidos en el ensayo mostraron una tendencia decreciente después de los 120 min; esto se debe a la saturación de los sitios activos de la enzima, lo que provoca cambios diferenciales insignificantes en la concentración de acumulación del sustrato [19]. Otra explicación de este comportamiento puede estar relacionado a la inhibición de la enzima causada por los productos de la reacción, ya que estos, en algunos casos pueden actuar como inhibidores de la misma enzima, reduciendo su actividad [20].

Vale la pena resaltar que los análisis estadísticos realizados permitieron concluir que no existió una diferencia estadísticamente significativa entre los tiempos del tratamiento evaluados, y como se evidenció, la degradación enzimática se produjo en un período de tiempo corto (2 min). Estudios previos han demostrado que un tratamiento enzimático puede lograr una rápida degradación de colorantes en tiempos de contacto cortos. Por ejemplo, se han reportado porcentajes de decoloración del 90% en periodos de tiempo inferiores a 1,0 minuto, al trabajar con oxidorreductasas como la peroxidasa [21]. Asimismo, en un estudio en el que trabajaron con peroxidasas de nabo (*Brassica rapa*), para degradar el colorante cristal ponceau 6R, reportaron que un tiempo de contacto de 0,75 min fue suficiente para alcanzar una degradación del 98,2% del colorante, a pH de 4,0 [8]. Estas mismas enzimas fueron usadas por otros investigadores, quienes lograron la degradación del 90% de 50 mg/l del colorante rojo congo, en un tiempo de reacción de 2 min [22]. También, Ali et al. 2013 lograron la degradación completa de 40 mg/l de cristal ponceau 6R en 1,0 minuto a pH 5,0, utilizando una peroxidasa de soja [21].

Los complejos enzimáticos utilizados en este trabajo pertenecen al grupo de oxidorreductasas, una categoría de enzimas ampliamente utilizadas en la biorremediación para oxidar subproductos de tintes presentes en aguas residuales textiles contaminadas. Estas enzimas se han considerado como ideales para esta tarea debido a que su proceso de producción es rápido y, a su capacidad de funcionar en un solvente acuoso con un pH neutro o básico, que es común en aguas residuales textiles [23]. En este contexto, el complejo enzimático C, una oxidorreductasa, se presenta como una opción viable para la

biorremediación de agua residual textil contaminada con tintes.

El complejo enzimático E no mostro decoloración en este ensayo, esto puede ser debido a que este complejo tiene un pH óptimo de catálisis reportado a pH de 4,0 como se mostró en la Tabla 1; por lo que se puede asumir que el pH de la muestra de agua residual inhibió la acción de este complejo enzimático. Estos resultados son consistentes con trabajos previos, en los que han reportado que cualquier fluctuación en el pH del sustrato puede causar un cambio en la forma del sitio activo de la enzima lo cual altera el estado iónico de los aminoácidos y, por lo tanto, se provoca la pérdida de la actividad enzimática [24].

3.2 Pruebas de DQO en tratamientos con complejos enzimáticos.

En el presente estudio se llevaron a cabo pruebas para medir la Demanda Química de Oxígeno (DQO), una propiedad que indica la cantidad de materia orgánica y otras sustancias oxidables presentes en agua. Es importante señalar que un valor mayor a 400 mg/l O₂ de DQO indica la presencia de una cantidad considerable de compuestos orgánicos que son susceptibles de oxidación [25].

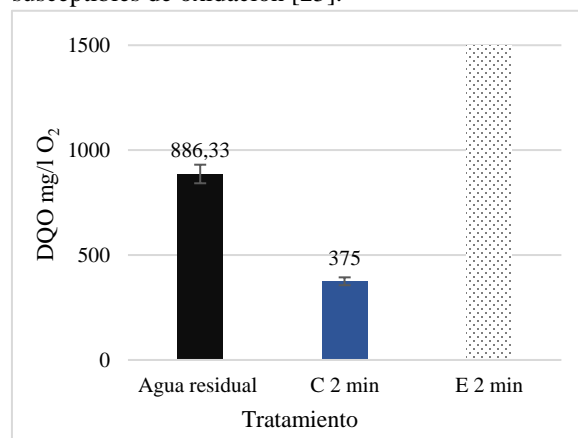


Figura 4. Valores de DQO en los tratamientos con complejos enzimáticos (E y C) a 2 min del ensayo con complejos enzimáticos

En este estudio, los resultados mostraron que el tratamiento con el complejo enzimático C redujo la medida de DQO, hasta un valor de 375 mg/l O₂. Esta cifra demuestra que se dio una reducción mayor al 50% con respecto al DQO de la muestra de agua residual sin tratamiento (886 mg/l O₂). Entre tanto, el ensayo con el complejo enzimático E presentó valores de DQO superiores a 1500 mg/l O₂, como se puede ver en la Figura 4, lo cual sugiere la existencia de una cantidad significativa de materia orgánica y otras sustancias

oxidables en la muestra analizada, posiblemente proveniente, de los soportes utilizados para la inmovilización de las enzimas en este complejo enzimático. Existen diversos tipos de soportes que pueden utilizarse, tanto en forma sólida como el grafito o los nanotubos de carbono [26] así como en forma líquida, como la celulosa líquida iónica activada con glutaraldehído, entre otros tipos de soportes [27].

3.3 Efecto del pH del medio de reacción en la degradación del AB194.

El estudio del efecto del pH en la degradación de tintes es importante ya que se sabe que el proceso depende del pH [28]. En esta investigación, se realizaron experimentos de decoloración del AB194 a diferentes pH con ambos complejos enzimáticos, los resultados de estas pruebas se muestran en la Figura 5.

Es preciso resaltar que el grado cambiante de decoloración es el resultado de las variaciones en la estructura de la proteína enzimática en respuesta al pH. Las proteínas enzimáticas sufren modificaciones estructurales como resultado de la protonación y la hidroxilación que podría darse en los sitios activos de la enzima antes de provocar su desnaturalización y la pérdida permanente de funcionalidad [14]. En la Figura 5 se observa que el complejo enzimático E logró una eficiencia máxima de decoloración del 22,84% a un pH de $6,0 \pm 0,2$, mientras que a pH $12,0 \pm 0,2$ se registró una eficiencia del 6,16%. Por otro lado, el complejo enzimático C logró porcentajes de decoloración del 14,62% y del 6,57% a pH $6,0 \pm 0,2$ y $10,0 \pm 0,2$, respectivamente. Estos resultados demuestran una vez más la capacidad de los complejos enzimáticos para degradar colorantes varía dependiendo de las condiciones trabajadas. Por lo tanto, es viable utilizar complejos enzimáticos en la remediación de agua residual, ya que esta matriz puede presentar fluctuaciones en sus condiciones físico-químicas. Nuestros resultados están de acuerdo con lo expuesto por otros autores, quienes exponen que la capacidad catalítica de los complejos enzimáticos se ve influenciada por el pH [24].

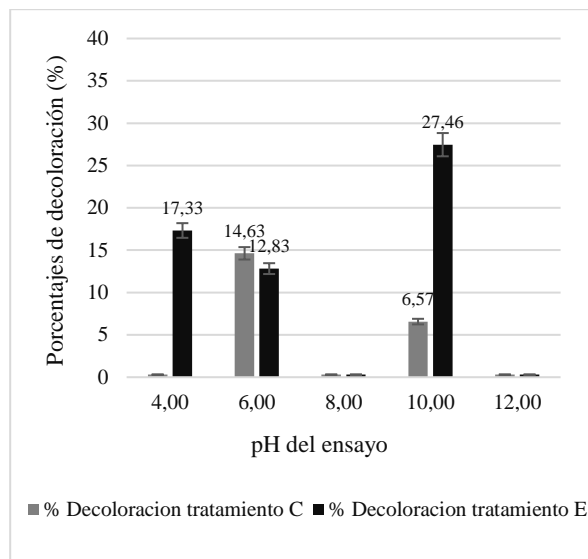


Figura 5. Efecto del pH en la decoloración de agua residual con el colorante AB194 después de los tratamientos con los complejos enzimáticos (C y E)

Según la literatura, las oxidoreductasas son enzimas que catalizan reacciones de hidrólisis, oxidación o reducción [29]. Además, es característico de este tipo de enzimas trabajar de manera óptima dentro de un intervalo de pH neutro [23], como se ha podido observar en este caso, en el que el complejo enzimático C, mostró disminución en la coloración y el DQO, en un intervalo de pH neutro.

3.4 Degradación de AB194 con *F. oxysporum*

Para iniciar, es relevante señalar que el medio líquido utilizado para el cultivo del hongo fue adecuado para el crecimiento de *F. oxysporum*, y que ninguno de los medios que contenían agua residual inhibió su crecimiento.

Se ha reportado previamente la capacidad decolorante de *F. oxysporum* en colorantes azoicos distintos al AB194, por ejemplo, Thoa y sus colegas, encontraron que el uso de *F. oxysporum*, provoca una degradación $\geq 90\%$, del naranja II, el violeta cristal, la anilina azul y el negro reactivo.[12]

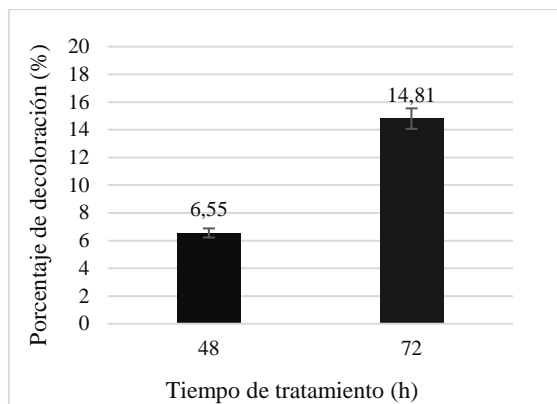


Figura 6. Porcentajes de decoloración a 577 nm de longitud de onda para el ensayo de remoción de colorante negro ácido 194 empleando *F. oxysporum*

En la figura 6 se puede apreciar el comportamiento de la degradación del colorante AB194 a lo largo del tiempo evaluado utilizando el hongo *F. oxysporum*. Se puede observar que desde el primer momento de análisis (48 h) se presentó una disminución en el porcentaje del colorante presente en la solución y a medida que transcurrió el tiempo, se observó un aumento en la capacidad de degradación del colorante, lo cual se reflejó en un incremento en el porcentaje de decoloración. Sin embargo, es importante destacar que este incremento no se produjo de manera drástica, lo que puede indicar una disminución de la capacidad de degradación del hongo en etapas posteriores, debida posiblemente a la saturación del hongo con la sustancia contaminante [30] lo cual provoca la activación de un mecanismo de salida del tinte de las células fúngicas para reducir la toxicidad [31]. Los valores de decoloración encontrados en este estudio, son similares a lo reportado por Porri y sus colaboradores, quienes trabajaron con *F. oxysporum* y encontraron una baja degradación durante los primeros dos días del ensayo (16%), pero después de 48 h la degradación se incrementó hasta alcanzar un 100 % de decoloración después de 144 h [11].

Los tratamientos de biorremediación con organismos vivos se consideran una alternativa viable y asequible, debido a que los organismos son capaces de adaptarse a las condiciones de los contaminantes y degradarlos, en algunos casos sin generar residuos tóxicos para el ambiente [32]. En particular en este ensayo se constata la capacidad de resiliencia de *F. oxysporum* frente a contaminantes y su capacidad de degradarlos.

Conclusión

La industria textil busca alternativas de bajo costo, altamente efectivas y rápidas para mitigar los impactos negativos que genera, dentro de esta exploración la biorremediación se presenta como una alternativa

viable. En el presente estudio, se evaluó el rendimiento de los complejos enzimáticos C y E, así como el hongo *F. oxysporum*, para la decoloración del colorante azoico AB194. Con este trabajo se logró la biodegradación de este tinte sintético recalcitrante por parte del *F. oxysporum*. Así mismo, los complejos enzimáticos actuaron como catalizadores efectivos para la degradación del colorante AB194.

Los resultados obtenidos con los complejos enzimáticos mostraron eficiencia de decoloración con tiempos de proceso cortos (2 min), lo que indica que los métodos enzimáticos son enfoques factibles para la degradación de colorantes en soluciones acuosas. Además, estos métodos permiten condiciones moderadas en la decoloración y un uso limitado de productos químicos agresivos, lo que crea una operación sostenible y respetuosa con el ambiente con una economía de procesos baja. No obstante, se sugiere la necesidad de estudios adicionales para seleccionar adecuadamente las condiciones del proceso, como la cantidad de complejo enzimático o del hongo, la temperatura de trabajo o la adición de suplementos a las matrices de ensayo.

Agradecimientos

Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados (PRISMA).

Grupo de Biotecnología y Productos Naturales de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad de Caldas.

Al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia por la financiación del proyecto 70154: “Tecnologías alternativas para el tratamiento de agua residual de la industria textil”.

Semillero de investigación en microbiología ambiental de la universidad de Caldas (SIMA).

Referencias

- [1] M. Bilal et al., “Immobilized ligninolytic enzymes: An innovative and environmental responsive technology to tackle dye-based industrial pollutants – A review”, *Science of the Total Environment*, vol. 576, pp. 646–659, ene. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.137.
- [2] M. H. Vijaykumar, P. A. Vaishampayan, Y. S. Shouche, y T. B. Karegoudar, “Decolourization of naphthalene-containing sulfonated azo dyes by *Kerstersia* sp. strain VKY1”, *Enzyme Microb Technol*, vol. 40, núm. 2, pp. 204–211, ene. 2007, doi: 10.1016/j.enzmictec.2006.04.001.

- [3] J. Vidal, L. Villegas, J. M. Peralta-Hernández, y R. Salazar González, “Removal of Acid Black 194 dye from water by electrocoagulation with aluminum anode”, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 51, núm. 4, pp. 289–296, mar. 2016, doi: 10.1080/10934529.2015.1109385.
- [4] G. Munteanu, P. Karakashkova, y A. Eliyas, “Parameter optimization of a semi-batch water decontamination slurry photocatalytic reactor using Taguchi-Grey technique”, *Bulgarian Chemical Communications*, vol. 53, núm. 4, pp. 442–446, 2021, doi: DOI: 10.34049/bcc.53.4.5442.
- [5] A. Cortazar-Martínez, C. A. González-Ramírez, C. Coronel-Olivares, J. A. Escalante-Lozada, J. Castro-Rosas, y J. R. Villagómez-Ibarra, “Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil”, *Universidad y Ciencia*, vol. 28, núm. 2, pp. 187–199, 2012. Disponible en: www.universidadyciencia.ujat.mx
- [6] R. L. Singh, P. K. Singh, y R. P. Singh, “Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes – A review”, *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 104, pp. 21–31, oct. 2015, doi: 10.1016/j.ibiod.2015.04.027.
- [7] A. Kandelbauer y G. M. Guebitz, “Bioremediation for the Decolorization of Textile Dyes - A Review”, en *Environmental Chemistry*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, pp. 269–288. doi: 10.1007/3-540-26531-7_26.
- [8] M. A. Almaguer, R. R. Carpio, T. L. M. Alves, y J. P. Bassin, “Experimental study and kinetic modelling of the enzymatic degradation of the azo dye Crystal Ponceau 6R by turnip (*Brassica rapa*) peroxidase”, *J Environ Chem Eng*, vol. 6, núm. 1, pp. 610–615, feb. 2018, doi: 10.1016/j.jece.2017.12.039.
- [9] D. Iark et al., “Enzymatic degradation and detoxification of azo dye Congo red by a new laccase from *Oudemansiella canarii*”, *Bioresour Technol*, vol. 289, p. 121655, oct. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121655.
- [10] R. T. Kapoor, M. Danish, R. S. Singh, M. Rafatullah, y A. K. H.P.S., “Exploiting microbial biomass in treating azo dyes contaminated wastewater: Mechanism of degradation and factors affecting microbial efficiency”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 43, p. 102255, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102255.
- [11] A. Porri et al., “*Fusarium oxysporum* degradation and detoxification of a new textile-glycoconjugate azo dye (GAD)”, *Fungal Biol*, vol. 115, núm. 1, pp. 30–37, ene. 2011, doi: 10.1016/j.funbio.2010.10.001.
- [12] L. T. K. Thoa et al., “Microbial biodegradation of recalcitrant synthetic dyes from textile-enriched wastewater by *Fusarium oxysporum*”, *Chemosphere*, vol. 325, p. 138392, jun. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138392.
- [13] M. Cardona, J. Osorio, y J. Quintero, “Degradación de colorantes industriales con hongos ligninolíticos”, *Revista Facultad Ingenierías Universidad de Antioquia*, vol. 48, pp. 27–37, 2009.
- [14] T. Chiong, S. Y. Lau, Z. H. Lek, B. Y. Koh, y M. K. Danquah, “Enzymatic treatment of methyl orange dye in synthetic wastewater by plant-based peroxidase enzymes”, *J Environ Chem Eng*, vol. 4, núm. 2, pp. 2500–2509, jun. 2016, doi: 10.1016/j.jece.2016.04.030.
- [15] J. Osorio Echavarría, A. Isabel, V. Benavides, J. Carlos, y Q. Díaz, “Decoloración de aguas residuales textiles utilizando el hongo ligninolítico anamorfo R1 de *Bjerkandera sp.*”, *Revista Facultad Ingenierías Universidad de Antioquia*, vol. 57, pp. 85–93, 2011.
- [16] M. J. Rodríguez Albarrán, “Estudio físico sobre la interacción de plasmas atmosféricos con colorantes textiles: caso negro ácido 194”, *Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias*, 2018.
- [17] Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible, *Resolucion-631-2015*, Colombia, 2015.
- [18] R. Kumar Salar Chaudhary Devi, “Decolorization of Reactive Blue MR using *Aspergillus* species Isolated from Textile Waste Water Bioactive Constituents View project Decolorization of Reactive Blue MR, using *Aspergillus* species Isolated from Textile Waste Water”, *ISCA Journal of Biological Sciences*, vol. 1, núm. 1, pp. 24–29, 2012, [En línea]. Disponible en: www.isca.in
- [19] J.-Z. Liu, T.-L. Wang, y L.-N. Ji, “Enhanced dye decolorization efficiency by citraconic anhydride-modified horseradish peroxidase”, *J Mol Catal B Enzym*, vol. 41, núm. 3–4, pp. 81–86, ago. 2006, doi: 10.1016/j.molcatb.2006.04.011.
- [20] N. S. Punekar, *ENZYMES: Catalysis, Kinetics and Mechanisms*. Singapore: Springer Singapore, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0785-0.
- [21] L. Ali, R. Algaithi, H. M. Habib, U. Souka, M. A. Rauf, y S. S. Ashraf, “Soybean peroxidase-mediated degradation of an azo dye– a detailed

mechanistic study”, *BMC Biochem*, vol. 14, núm. 1, p. 35, dic. 2013, doi: 10.1186/1471-2091-14-35.

[22] A. Ahmedi, M. Abouseoud, A. Couvert, y A. Amrane, “Enzymatic Degradation of Congo Red by Turnip (*Brassica rapa*) Peroxidase”, *Zeitschrift für Naturforschung C*, vol. 67, núm. 7–8, pp. 429–436, ago. 2012, doi: 10.1515/znc-2012-7-811.

[23] A. Wells, M. Teria, y T. Eve, “Green oxidations with laccase–mediator systems”, *Biochem Soc Trans*, vol. 34, núm. 2, p. 304, abr. 2006, doi: 10.1042/BST20060304.

[24] U. Kalsoom, H. N. Bhatti, y M. Asgher, “Characterization of Plant Peroxidases and Their Potential for Degradation of Dyes: a Review”, *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 176, núm. 6, pp. 1529–1550, jul. 2015, doi: 10.1007/s12010-015-1674-3.

[25] M. A. Rodríguez Oviedo, A. D. Sanchez Suarez, y R. N. Agudelo Valencia, “Electrocoagulación con radiación UV para remover DQO, COT y SDT en aguas residuales de la industria textil empleando electrodos de grafito”, *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 13, núm. 2, pp. 201–219, jun. 2022, doi: 10.22490/21456453.4723.

[26] W. Feng y P. Ji, “Enzymes immobilized on carbon nanotubes”, *Biotechnol Adv*, vol. 29, núm. 6, pp. 889–895, nov. 2011, doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.07.007.

[27] R. I. Meneau Hernández, K. B. Morales, M. Liva Garrido, y T. Fariñas Piñera, “Inmovilización una mirada a los métodos, soportes y retos. Immobilization

a look at the methods, supports and challenges”, *Rev. CENIC Cienc. Biol*, vol. 52, núm. 1, pp. 59–78, 2021.

[28] E. Routoula y S. V. Patwardhan, “Degradation of Anthraquinone Dyes from Effluents: A Review Focusing on Enzymatic Dye Degradation with Industrial Potential”, *Environ Sci Technol*, vol. 54, núm. 2, pp. 647–664, ene. 2020, doi: 10.1021/acs.est.9b03737.

[29] H. R. Lotfy y I. G. Rashed, “Predicting the fate and the biological treatment parameters of phenol in a wastewater from its initial concentration”, *Biomass Convers Biorefin*, jul. 2022, doi: 10.1007/s13399-022-03153-1.

[30] M. A. Hefnawy, M. M. Gharieb, M. T. Shaaban, y A. M. Soliman, “Optimization of Culture Condition for Enhanced Decolorization of Direct blue Dye by *Aspergillus flavus* and *Penicillium canescens*”, *J Appl Pharm Sci*, vol. 7, núm. 2, pp. 083–092, 2017, doi: 10.7324/JAPS.2017.70210.

[31] M. T. Selim, S. S. Salem, A. A. Mohamed, M. S. El-Gamal, M. F. Awad, y A. Fouda, “Biological Treatment of Real Textile Effluent Using *Aspergillus flavus* and *Fusarium oxysporium* and Their Consortium along with the Evaluation of Their Phytotoxicity”, *Journal of Fungi*, vol. 7, núm. 3, pp. 193–213, mar. 2021, doi: 10.3390/jof7030193.

[32] B. S. Goud, H. L. Cha, G. Koyada, y J. H. Kim, “Augmented Biodegradation of Textile Azo Dye Effluents by Plant Endophytes: A Sustainable, Eco-Friendly Alternative”, *Curr Microbiol*, vol. 77, núm. 11, pp. 3240–3255, nov. 2020, doi: 10.1007/s00284-020-02202-0.