



Decoloración de efluentes textiles que contienen colorantes reactivos empleando extracto de alcachofa

Miriam Janet Gil Garzón¹ / Jorge Iván Usma Gutierrez² / Adriana María Soto Zuluaga³
Omar Darío Gutiérrez Florez⁴ / Guillermo León Sánchez Sánchez⁵ / Teresa Jiménez Lobo⁶

Discoloration of textile effluents with reactive dyes, by the use of artichoke extract

Descoloração de efluentes têxteis que contém corantes reativos empregando extrato de alcachofra

RESUMEN

Introducción. La enzima peroxidasa es conocida por su capacidad para eliminar compuestos fenólicos y aminas aromáticas en solución acuosa, recientemente se ha propuesto el empleo de esta enzima en la decoloración de efluentes textiles. **Objetivo.** Evaluar el efecto que tuvo el empleo de un extracto de alcachofa con actividad peroxidasa y peroxidasa comercial, en la decoloración de un efluente textil y dos de los colorantes presentes en el efluente. **Materiales y Métodos.** Los ensayos de decoloración se llevaron a cabo sobre una muestra de efluente que contenía una mezcla de colorantes directos, dispersos y reactivos, proveniente de una empresa textil y dos soluciones de colorantes reactivos. Para todas las muestras se emplearon proporciones con el agente degradante 2:1 respectivamente, además se adicionó 0.1 mL de peróxido de hidrógeno al 35% para activar la enzima. Las mediciones de absorbancia se hicieron en un espectrómetro UV-Vis. **Resultados.** El empleo de extracto de alcachofa favoreció la decoloración de las muestras, evidenciándose una disminución en la absorbancia entre el 40 – 60%, desde el momento inicial del tratamiento. **Conclusión.** Se evidenció que el uso de extracto de alcachofa y peroxidasa comercial, son una buena alternativa en la decoloración

¹Química, Magíster en Ciencias-Química. Docente Instituto Tecnológico Metropolitano, ITM. ²Ingeniero Químico. Candidato a Magíster en Ciencias-Química. Docente Instituto Tecnológico Metropolitano, ITM. ³Licenciada en Biología y Química. Magíster en Ciencias-Química. Docente Instituto Tecnológico Metropolitano, ITM. ⁴Ingeniero Químico. Magíster en Ciencias-Química. Docente Instituto Tecnológico Metropolitano, ITM. ⁵Químico. Candidato a Magíster en Ciencias-Química. Docente Instituto Tecnológico Metropolitano, ITM. ⁶Química. Especialista en Gestión Energética Industrial. Docente Instituto Tecnológico Metropolitano, ITM.

Correspondencia: Miriam Janet Gil Garzón, e-mail: miriamgil@itm.edu.co

Artículo recibido: 25/11/2011, Artículo aprobado: 14/12/2011

de efluentes textiles frente al uso de métodos convencionales, siendo el extracto de alcachofa una alternativa prometedora por su menor costo.

Palabras clave: alcachofa, peroxidasa, efluentes textiles, degradación, colorantes.

ABSTRACT

Introducción. Peroxidase is an enzyme known for its capability to eliminate phenolic compounds and aromatic amines in aqueous solutions. Its use has been recently proposed for discoloring textile effluents. **Objective.** To evaluate the effect of an artichoke extract with peroxidase activity and commercial peroxidase on the discoloration of a textile effluent and on two of the dyes within the effluent. **Materials and methods.** The discoloration tests were performed on a sample of the effluent that had a mixture of direct, disperse and reactive dyes from a textile company and two reactive dyes solutions. Proportions with the degrading agent 2:1 were used for all of the samples. Also, 0.1 mL of hydrogen peroxide at 35% was added in order to activate the enzyme. Absorbance measurements were performed with a UV-Vis spectrophotometer. **Results.** The use of the artichoke extract favored the discoloration of the samples, producing a reduction in the absorbance between 40-60% from the beginning of the treatment. **Conclusion.** The use of artichoke extract and commercial peroxidase is a good alternative in the discoloration of textile effluents if compared to conventional methods, and artichoke extract is a promising alternative given its low cost.

Key words: artichoke, peroxidase, textile effluents, degradation, dyes.

RESUMO

Introdução. A enzima peroxidasa é conhecida por sua capacidade para eliminar compostos fenólicos e aminas aromáticas em solução aquosa. Recentemente se propôs o emprego desta enzima na descoloração de efluentes têxteis. **Objetivo.** Avaliar o efeito que teve o emprego de um extrato de alcachofra com atividade peroxidasa e peroxidasa comercial, na descoloração de um efluente têxtil e dois dos corantes presentes no efluente. **Materiais e métodos.** Os ensaios de descoloração se levaram a cabo sobre uma mostra de efluente que continha uma mistura de corantes diretos, dispersos e reativos, proveniente de uma empresa têxtil e duas soluções de corantes reativos. Para todas as mostras se empregaram proporções com o agente degradante 2:1, respectivamente; ademais, adicionou-se 0.1 ml de peróxido de hidrogênio ao 35% para ativar a enzima. As medições de absorvência se fizeram num espectrômetro UV-Vis. **Resultados.** O emprego de extrato de alcachofra favoreceu a descoloração das mostras, ao evidenciar uma diminuição na absorvência entre 40-60%, desde o momento inicial do tratamento. **Conclusão.** Se evidenciou que o uso de extrato de alcachofra e peroxidasa comercial é uma boa alternativa na descoloração de efluentes têxteis frente ao uso de métodos convencionais, e o extrato de alcachofra é uma alternativa promissora por seu menor custo.

Palavras importantes: alcachofra, peroxidasa, efluentes têxteis, degradação, corantes.

INTRODUCCIÓN

Los colorantes sintéticos son extensamente utilizados en la industria; aproximadamente 10,000 diferentes tipos de colorantes y pigmentos son usados en la producción textil, representando un consumo anual de alrededor de 7×10^5 toneladas en todo el mundo¹. Estos colorantes se caracterizan por ser sustancias recalcitrantes y tóxicas, resistentes a la degradación biológica, y por tanto no se eliminan fácilmente en plantas de tratamiento de aguas residuales². Actualmente el tratamiento de aguas residuales y su recuperación es obligatoria³.

Recientemente se ha propuesto el empleo de enzimas con actividad peroxidasa, para ser utilizada en la degradación oxidativa de compuestos coloreados en presencia de peróxido de hidrógeno^{4,5,6}. Este método presenta ventajas ya que no forma productos secundarios tóxicos, no es costoso, es fácil de

manipular, no es peligroso y además no provoca alteraciones ecológicas⁷. La especificidad de las enzimas evita reacciones indeseables que incrementan el consumo de reactivos que generan aumento en la contaminación.

Las enzimas con actividad peroxidasa son utilizadas en laboratorios clínicos, en la industria, en aplicaciones medioambientales en la degradación de compuestos coloreados entre otros^{8,9}. La peroxidasa cataliza la oxidación de un amplio número de sustratos orgánicos e inorgánicos, y se encuentra distribuidas en animales (ratas, conejos, cerdos), plantas superiores (rábano picante, mango, arroz, soya, piña, pera, papa, tabaco, maíz, maní, caña de azúcar, tomate, remolacha, nabo), levaduras, hongos y bacterias^{10,11,12}.

La Comisión Científica de la Unión Europea ha definido a las peroxidasas como una de las proteínas con mayor interés biotecnológico para el siglo XXI, por su aplicación en la conservación del ambiente. En esta línea estas enzimas pueden sustituir a algunos reactivos y catalizadores químicos usados hoy en día en cierto tipo de industrias, además facilitan la remoción de compuestos orgánicos contaminantes.¹³

Las aplicaciones y las fuentes de obtención de la peroxidasa son variadas, pero no encontramos en la literatura trabajos anteriores sobre el uso de un extracto de alcachofa con actividad peroxidasa para la decoloración de efluentes textiles, ya que la mayoría de las investigaciones se han enfocado en la peroxidasa extraída del rábano picante^{13,14}. En este estudio se evaluó la eficiencia en la decoloración de un efluente textil y dos colorantes, usando un extracto que tiene actividad peroxidasa obtenido de la alcachofa y ensayos análogos con peroxidasa comercial. El efecto de decoloración y el grado de descontaminación visual se correlacionó mediante las lecturas de absorbancia en el rango UV-Vis.

MATERIALES Y METODOS

Muestra de efluente

La muestra coloreada (efluente) utilizada en este trabajo provino de una empresa ubicada en un municipio Antioqueño. La muestra fue recogida directamente sin ningún tratamiento previo, a la salida del tanque; ésta contenía una mezcla de colorantes reactivos, directos y dispersos, utilizados en los procesos de teñido de la empresa. La muestra utilizada se llevó a una concentración de 5 ml/L para su análisis.

Colorantes (muestras)

La muestra del efluente estaba en su mayoría compuesta de residuos de colorantes reactivos que en el momento estaban en “tono moda” tales como: Rojo reactivo 14I y azul reactivo 21, colorantes evaluados a una concentración de 25 ppm, semejantes a las concentraciones presentes en el efluente.

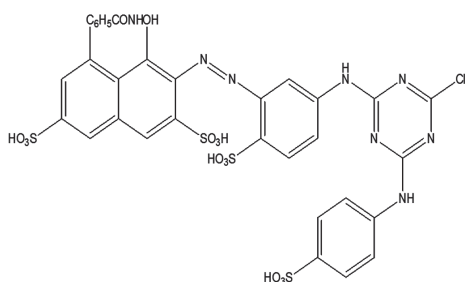


Figura 1. Estructura colorante Rojo Reactivo 14I¹⁵

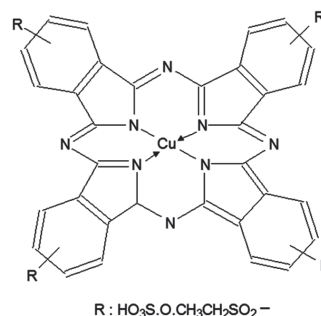


Figura 2. Estructura colorante Azul Reactivo 21¹⁶

Enzima peroxidasa

La enzima peroxidasa de rábano picante (HRP) usada en este estudio fue de la casa comercial Sigma-Aldrich. La solución enzimática fue preparada en una solución buffer de citrato fosfato (pH 5 y 50 mmol L⁻¹) con una concentración de 29.85 U mL⁻¹.

Extracto de alcachofa con actividad peroxidasa

A 100 g del material vegetal de alcachofa, incluyendo hojas, tallos y flores, se le agregó una solución que contenía 500 ml de H₂O con: 2.5 g de sulfato de amonio, 2.5 g de ácido ascórbico, 2.5 g de EDTA, 0.5 g de polivinil pirrolidona (PVP K-30), se homogenizó en una licuadora doméstica por 5 minutos, el pH de la solución resultante se neutralizó con NaOH diluido. El producto obtenido se filtró, centrifugó a 3500 rpm por 10 minutos y se concentró en un rotaevaporador a 60°C¹³.

Los reactivos empleados para la obtención del extracto (sulfato de amonio, ácido ascórbico, EDTA, PVP, NaOH, L-30) eran grado comercial.

La concentración del extracto de alcachofa utilizada fue de 5ml/L.

Los agentes degradantes utilizados fueron: extracto de alcachofa, extracto de alcachofa – peróxido de hidrógeno al 35% y peroxidasa comercial con adiciones de peróxido de hidrógeno al 35%. De acuerdo a Arruda et al, el uso de peroxidasa comercial requiere de adiciones de peróxido de hidrógeno con el fin de activar la enzima¹⁴.

Las lecturas de absorbancia en la determinación de la decoloración, fueron medidas en un Espectrofotómetro UV-Vis, serie 8453A con DAD, marca: Agilent Technologies.

Determinación de las lecturas de absorbancia en la decoloración del efluente con extracto de alcachofa y peroxidasa comercial

Para las muestras tanto de efluente como de los colorantes con extracto de alcachofa (5ml/L) y peroxidasa comercial, se empleó una proporción 2:1; además se adicionó peróxido de hidrogeno al 35% para activar la enzima comercial y el extracto, en proporciones 2: 1: 0.1 respectivamente.

Las lecturas de absorbancia se realizaron en todo el espectro UV –Vis, tomando para el análisis las longitudes de onda más representativas en cada muestra, utilizando un Espectrofotómetro UV-Vis. La decoloración se determinó a través de la diferencia entre las zonas iniciales y finales. Los experimentos fueron realizados a temperatura ambiente de 25°C.

Análisis estadístico

Para el estudio de los datos se empleó el programa estadístico R y los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA)¹⁷ de una vía (tratamiento con cuatro niveles), con un nivel de confianza del 95% y un nivel de potencia para detectar diferencias significativas del 90%. Además se realizó una prueba de diferencia significativa honesta (HSD) de Tukey con el fin de detectar que pares de tratamientos difieren entre sí, utilizando la función TukeyHSD de R¹⁸. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación de las longitudes de onda

Se realizaron lecturas de absorbancias en todo el espectro UV –Vis, eligiendo aquellas donde había más absorción. En la región ultravioleta, las bandas de más absorción aumentaron al adicionar el agente decolorante debido a que ambas sustancias, efluente – agente decolorante, absorben a esta misma longitud de onda, por tal razón el análisis sólo se hizo en la región visible.

Para la muestra del efluente las longitudes de onda seleccionadas fueron 486 y 598 nm, para la muestra de colorante rojo reactivo 141 y azul reactivo 21 fueron 520, 544 nm y 660, 622 nm, respectivamente.

Tratamiento de los colorantes Rojo reactivo 141 y Azul Reactivo 21 con extracto de alcachofa, extracto – peróxido y peroxidasa comercial – peróxido

Se reportan los resultados de absorbancias de los colorantes, Rojo reactivo 141 y Azul reactivo 21. El proceso realizado fue: colorante con extracto de alcachofa, colorante con extracto de alcachofa - peróxido y colorante con peroxidasa comercial - peróxido, para luego ser analizado en las longitudes de onda de 520 - 544 nm y 622 - 660 nm respectivamente.

Colorante Rojo reactivo 141

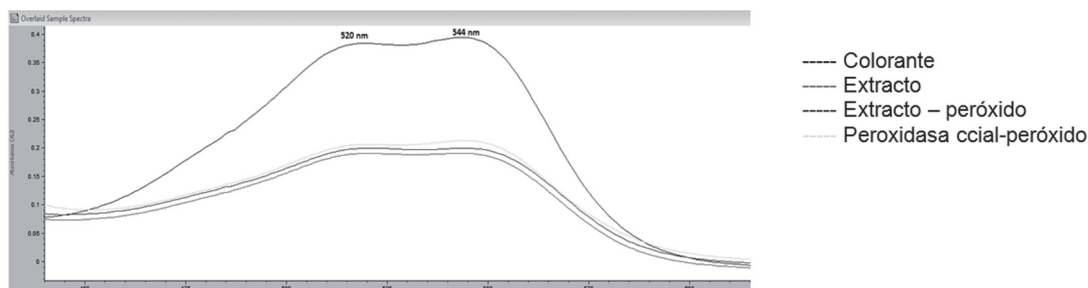


Figura 3. Espectro de absorbancias del colorante Rojo Reactivo 141 con un tiempo de residencia $t = 0$ min

Tabla I. Absorbancias en el tratamiento del colorante Rojo Reactivo 141 con los agentes decolorantes y tiempos de residencia de 0 y 10 minutos

		Absorbancias del Colorante Rojo reactivo 141			
		Tiempo de residencia de 0 minutos		Tiempo de residencia de 10 minutos	
		520 nm	544 nm	520 nm	544 nm
Tratamiento	Colorante	$0,38404 \pm 0.00001$	$0,39461 \pm 0.00003$	$0,38404 \pm 0.00001$	$0,39461 \pm 0.00001$
	Colorante - extracto	$0,19011 \pm 0.00001$	$0,19042 \pm 0.00001$	$0,16459 \pm 0.00001$	$0,16761 \pm 0.00002$
	Colorante - extracto - peróxido	$0,19945 \pm 0.00003$	$0,19939 \pm 0.00002$	$0,17276 \pm 0.00001$	$0,19939 \pm 0.00001$
	Colorante-peroxidasa comercial - peróxido	$0,20602 \pm 0.00002$	$0,21279 \pm 0.00001$	$0,17344 \pm 0.00001$	$0,1716 \pm 0.00002$

Según la figura 3 y tabla I, el colorante rojo reactivo 141, presentó disminución de la coloración al ser tratado con los agentes decolorantes, observándose una mayor disminución de la absorción cuando se aplicó el extracto de alcachofa solo, esto se debe a que la presencia del grupo azo – N=N- (figura 1)¹⁵,

en la estructura del colorante, sufre un ataque selectivo cuando se agrega solo el extracto, suspendiendo las conjugaciones que son las responsables del color, atacando más fácil el grupo azo¹⁹ que cuando hay presencia del agente activador, peróxido de hidrógeno, formándose un grupo grande con un mayor impedimento estérico dificultando su ataque y posterior rompimiento del grupo azo y rompimiento de la conjugación.^{20,21}

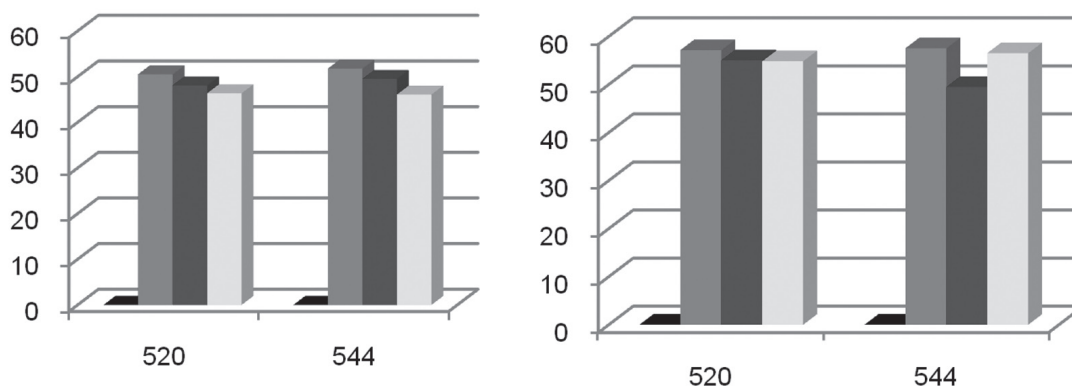


Figura 4. Porcentajes de decoloración del Rojo Reactivo 141 a tiempos de residencia 0 y 10 minutos respectivamente

--- Colorante, --- Colorante-extracto, --- Colorante-extracto-peróxido, --- Colorante-peroxidasa comercial-peróxido

La figura 4, muestra que los porcentajes de decoloración aumentaron a medida que transcurrió el tiempo, predominando la decoloración con el extracto de alcachofa, ya que el impedimento estérico no deja que la peroxidasa actúe en forma inmediata, sino que lo va haciendo en el tiempo.

Aunque en este estudio se reportaron resultados para tiempos de tratamiento hasta de 10 minutos, Lui y otros² afirma que 5 min son suficientes para lograr una degradación en colorantes reactivos. De otro lado Soto y otros²³ reportaron que el tiempo no es significativo en la disminución en la decoloración en efluentes textiles con colorantes de tipo reactivo.

El estadístico de prueba en el análisis de varianza es 725.44, con p-valor de 2.2×10^{-16} , por lo tanto presenta diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos (extracto, extracto – peróxido, peroxidasa comercial-peróxido) para el colorante. Del mismo modo puede observarse que entre los tratamientos, no hay una diferencia significativa, p-valor = 0.367.

La figura 5 presenta los valores medios con intervalos HSD al (95%) de los parámetros de abajo hacia arriba para: colorante rojo con colorante-extracto-peróxido (rojo - R_e_p), colorante rojo con colorante-peroxidasa comercial-peróxido (rojo - R_Pc_p), colorante-extracto-peróxido con colorante-peroxidasa comercial peróxido (R_e_p - R_Pc_p), colorante con colorante-extracto (rojo - R_e), colorante-extracto-peróxido con colorante extracto (R_e_p - R_e), colorante-peróxidasa comercial-peróxido con colorante-extracto (R_Pc_p - R_e); muestra que los tratamientos del colorante con los agentes decolorantes, presentan diferencias estadísticamente significativas, siendo más la presentada en el tratamiento del colorante con el extracto (rojo - R_e). Además como el cero se encuentra dentro de los intervalos, podemos decir que no existen diferencias significativas entre los tratamientos: (R_e_p - R_Pc_p), (R_e_p - R_e), (R_Pc_p - R_e).

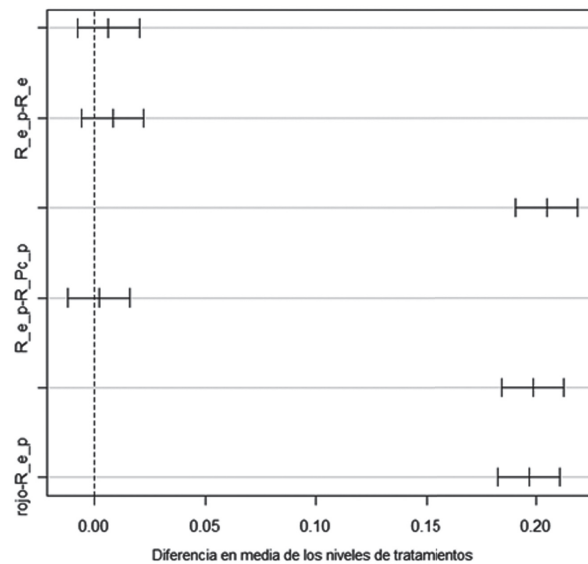


Figura 5. Intervalos de confianza HSD para el colorante Rojo reactivo 141

Colorante Azul reactivo 21

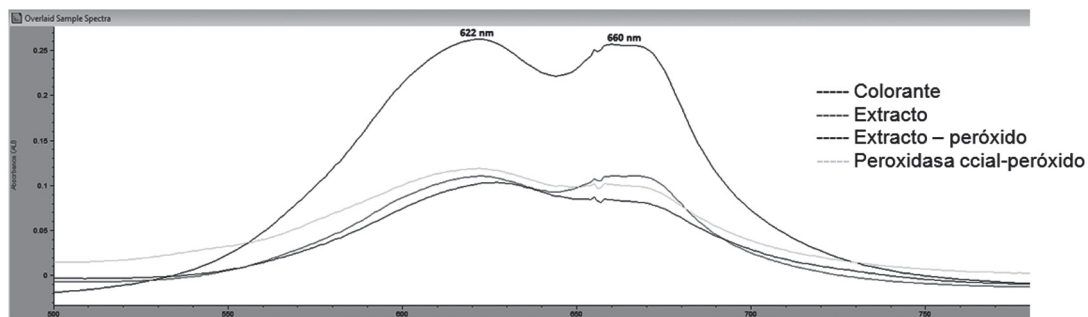


Figura 6. Espectro de absorbancias del colorante Azul Reactivo 21 con un tiempo de residencia $t = 0$ min

De la figura 6 y tabla 2, se puede apreciar que el tratamiento con el agente decolorante, extracto-peróxido, permitió una mayor decoloración en el colorante azul reactivo 21, seguido del agente peroxidasa comercial-peróxido, esto se debe a que la molécula presenta una estructura planar (figura 2)¹⁶ donde predominan los enlaces $-C=N-$ permitiendo una mayor conjugación y aunque los puntos de ataque son mayores, se presenta una “barrera protectora” que bloquea el ataque de la peroxidasa sola, esta barrera es vencida cuando el extracto es activado por el peróxido de hidrógeno, que hace que haya una orientación de electrones hacia el átomo más electronegativo, permitiendo que en esa orientación electrónica se peguen los grupos de la peroxidasa interrumpiendo la conjugación en los enlaces predominantes^{21,23,24}. Del mismo modo Silva y otros. reportaron que la presencia de peróxido de hidrógeno genera un mejor desempeño en la decoloración enzimática ($55.1 \pm 0.75\%$)²⁵.

La figura 7, muestra que aunque los porcentajes de decoloración aumentaron proporcionalmente a medida que transcurrió el tiempo, predominando la decoloración con el extracto – peróxido, seguido

de la peroxidasa comercial – peróxido, no fue tan significativa, esto fue debido a que el efecto presentado por los agentes decolorantes se fueron agotando más rápidamente cuando estaban activados en presencia del peróxido, porque se aceleró la descomposición de la peroxidasa.

El estadístico de prueba en el análisis de varianza es 1418.7, con p-valor de 2.2×10^{-16} , por lo tanto presenta diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos (extracto, extracto – peróxido, peroxidasa comercial-peróxido) para el colorante. Asimismo puede observarse que hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, p-valor = 3.62×10^{-6} .

Tabla 2. Absorbancias en el tratamiento del colorante Azul Reactivo 21 con los agentes decolorantes y tiempos de residencia de 0 y 10 minutos

		Absorbancias del Colorante Azul reactivo 21			
		Tiempo de residencia de 0 minutos		Tiempo de residencia de 10 minutos	
		622 nm	660 nm	622 nm	660 nm
Tratamiento	Colorante	0,26920 ± 0.00001	0,25701 ± 0.00002	0,26920 ± 0.00002	0,25701 ± 0.00002
	Colorante - extracto	0,11045 ± 0.00001	0,11062 ± 0.00002	0,11101 ± 0.00001	0,11331 ± 0.00003
	Colorante - extracto - peróxido	0,10212 ± 0.00002	0,08431 ± 0.00002	0,10042 ± 0.00003	0,08418 ± 0.00002
	Colorante-peroxidasa comercial - peróxido	0,11905 ± 0.00001	0,10109 ± 0.00002	0,11065 ± 0.00001	0,09430 ± 0.00002

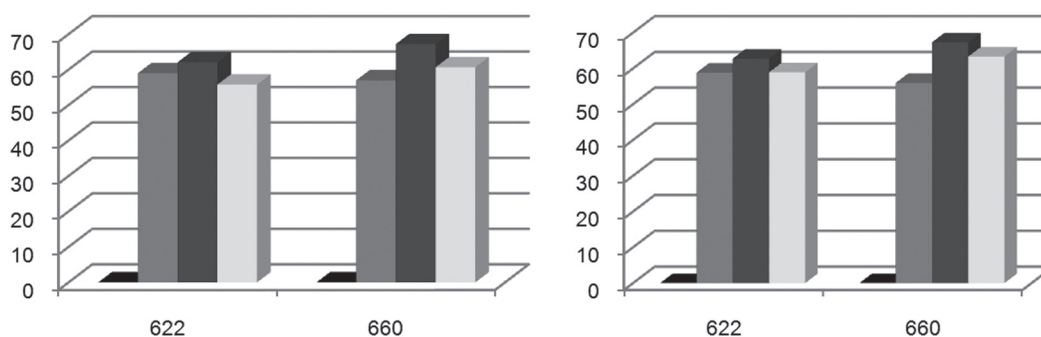


Figura 7. Porcentajes de decoloración del Azul reactivo 21 a tiempos de residencia 0 y 10 minutos respectivamente

--- Colorante, --- Colorante-extracto, --- Colorante-extracto-peróxido, --- Colorante-peroxidasa ccial-peróxido

La figura 8 presenta los valores medios con intervalos HSD al 95% de los parámetros, de abajo hacia arriba para: colorante azul con colorante-extracto (azul – A_e), colorante azul con colorante-peroxidasa comercial-peróxido (azul – A_Pc_p), colorante-extracto con colorante-peroxidasa comercial-peróxido (A_e – A_Pc_p), colorante con colorante-extracto-peróxido (azul – A_e_p), colorante-extracto con colorante-extracto-peróxido (A_e – A_e_p), colorante-peroxidasa comercial – peróxido con colorante-extracto-peróxido (A_Pc_p – R_e_p), muestra que los tratamientos del colorante con

los agentes decolorantes, presentan diferencias estadísticamente significativas, mostrando mayor significancia el tratamiento realizado entre colorante con extracto-peróxido (azul – A_e_p). También podemos decir que hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos: colorante-extracto y colorante-extracto-peróxido (A_e – A_e_p) y colorante_peroxidasa comercial_peróxido y colorante-extracto-peróxido (A_Pc_p – A_e_p).

Tratamiento en el efluente con extracto de alcachofa, extracto – peróxido y peroxidasa comercial – peróxido.

Se reportan los resultados de absorbancias del efluente al ser tratado con extracto de alcachofa, extracto de alcachofa - peróxido y peroxidasa comercial - peróxido, en las longitudes de onda máxima en el visible de 486 y 598 nm.

De la figura 9 y tabla 3 se puede ver que la absorbancia es más representativa cuando el efluente fue tratado con el extracto – peróxido, tal como se describe en Soto y otros²², seguido de la peroxidasa comercial-peróxido, éste comportamiento es similar al que hubo con el colorante azul reactivo 21 y se debió a que el efluente en estudio presentaba una coloración predominantemente azul.

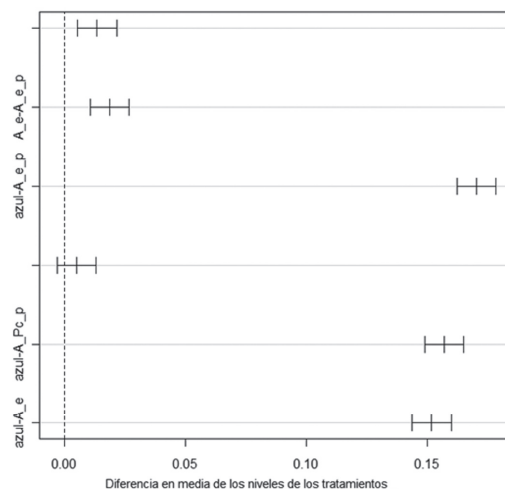


Figura 8. Intervalos de confianza HSD para el colorante Azul reactivo 21

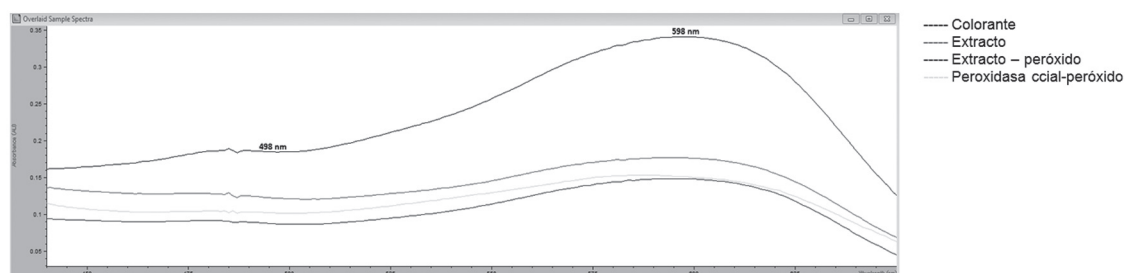


Figura 9. Espectro de absorbancia del efluente con un tiempo de residencia $t = 10$ min

Tabla 3. Absorbancias en el tratamiento del Efluente con los agentes decolorantes y tiempos de residencia de 0 y 10 minutos

		Absorbancias del Efluente			
		Tiempo de residencia de 0 minutos		Tiempo de residencia de 10 minutos	
		486 nm	598 nm	486 nm	598 nm
Tratamiento	Colorante	0,22200 ± 0.00003	0,34943 ± 0.00001	0,22200 ± 0.00001	0,34943 ± 0.00002
	Colorante - extracto	0,13685 ± 0.00001	0,17809 ± 0.00001	0,12519 ± 0.00001	0,17672 ± 0.00004
	Colorante - extracto - peróxido	0,12140 ± 0.00001	0,15428 ± 0.00001	0,08932 ± 0.00003	0,14836 ± 0.00001
	Colorante-peroxidasa comercial - peróxido	0,12867 ± 0.00002	0,20177 ± 0.00001	0,10491 ± 0.00003	0,15113 ± 0.00001

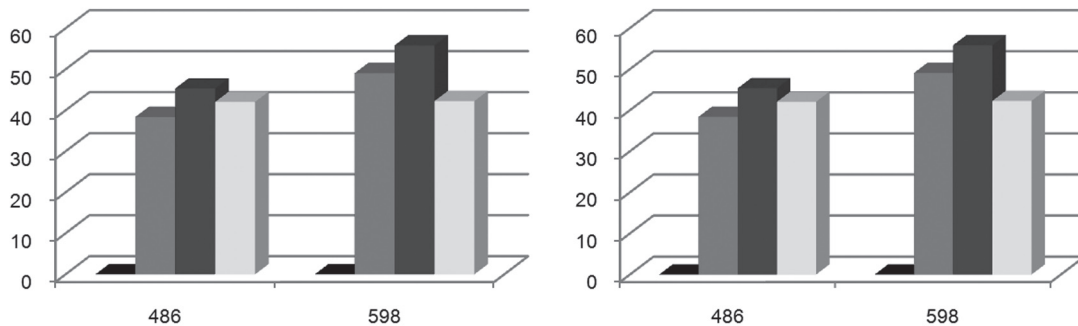


Figura 10. Porcentajes de decoloración del efluente a tiempos de residencia 0 y 10 minutos respectivamente

--- Colorante, --- Colorante-extracto, --- Colorante-extracto-peróxido, --- Colorante-peroxidasa comercial-peróxido

En la figura 10, se observa que transcurrido el tiempo hubo un aumento del porcentaje de decoloración proporcionalmente, aunque no significativo, esto se dio porque la naturaleza del efluente es distinta a la de los colorantes puros, presentando condiciones de pH diferentes. A pesar de que el efluente presentaba condiciones de pH "favorables" (básicos) para la decoloración (pH efluente = 8.11) donde la enzima es activada, no se presentó una buena decoloración ya que el efluente no solo tiene residuos de colorantes, sino también residuos del proceso de preparación de telas para la tinte, este proceso se conoce como descruce para eliminar impurezas antes de agregar el colorante, además de otros reactivos necesarios para que el color fije a la tela, estos métodos dejan residuos tales como: minerales, metales, etc, que no permiten que la enzima actúe más eficientemente, tal como si ocurre en los colorantes puros.

El porcentaje de decoloración obtenido en el efluente al ser tratado con peroxidasa comercial-peróxido de hidrógeno es de 56%, siendo cercano al obtenido por Arruda y otros¹⁴, el cual reportó un porcentaje de decoloración en un efluente de 52% aplicando un tratamiento similar.

El estadístico de prueba en el análisis de varianza es 34.926, con p-valor de 1.094×10^{-11} , por lo tanto presenta diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos (extracto, extracto – peróxido, peroxidasa comercial-peróxido) para el efluente. De igual manera con un p-valor = 0.112 entre los tratamientos, no se encuentran diferencias significativas.

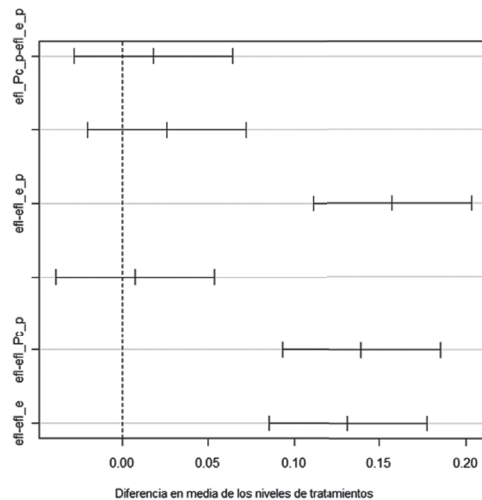


Figura 11. Intervalos de confianza HSD para el efluente

La figura 11, presenta los valores medios con intervalos HSD al 95% de los parámetros, de abajo hacia arriba para: efluente con efluente-extracto (eflu- eflu_e), efluente con efluente-peroxidasa comercial-peróxido (eflu- eflu_Pc_p), efluente-extracto con efluente-peroxidasa comercial-peróxido (eflu_e - eflu_Pc_p), efluente con efluente-extracto-peróxido (eflu - eflu_e_p), efluente-extracto con efluente-extracto-peróxido (eflu_e - eflu_e_p), efluente-peroxidasa comercial – peróxido con efluente-extracto-peróxido (eflu_Pc_p – eflu_e_p), manifestando que hay diferencias estadísticamente significativas, siendo mayor aquella entre efluente con efluente-extracto-peróxido (eflu - eflu_e_p). De igual manera, no hay diferencias significativas entre los tratamientos: (eflu_Pc_p – eflu_e_p), (eflu_e - eflu_e_p), (eflu_e - eflu_Pc_p).

CONCLUSIONES

La evaluación de los colorantes, de manera individual en presencia de un agente decolorante vegetal, permitió dar una mejor explicación del comportamiento de éstos cuando se encuentran como residuos en los efluentes textiles.

Este tipo de evaluación, permite establecer la presencia de la enzima peroxidasa presente en la alcachofa y su modo de utilización en los tratamientos de efluentes textiles.

El extracto de alcachofa presentó buenos porcentajes de decoloración, semejantes a los obtenidos con la peroxidasa comercial, permitiendo establecer que el extracto de alcachofa es una buena alternativa para ser utilizada como contratipo.

A pesar de que los colorantes cuando se encuentran en solución, presentan efectos batocrómicos e hipsocrómicos, que cambian el color en la solución. En las muestras tratadas con los agentes decolorantes, no se observó este fenómeno, ya que no hubo cambios en las posiciones de las bandas de absorción.

Los procesos planteados son adecuados para el tratamiento de los efluentes textiles, sin embargo el uso del peróxido de hidrógeno, aunque puede activar la peroxidasa, puede suprimirse cuando se trabaja con el extracto de alcachofa, ya que presenta disminuciones de color por encima del 38% empleando tiempos de residencia bajos, esto hace que este último sea un método alternativo y prometedor a bajos costos y disminuyen los efectos ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de Química, campus Fraternidad y a la laboratorista Carolina Yepes, del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM).

Por sus aportes y colaboración, agradecemos al profesor Carlos Javier Barrera Causil, docente del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA-Awwa-Wpfc. Standard methods for examination of water and wastewater. En: American Public Health Association. 16th ed Washington; 1985 p.1268.
2. LIU, Jian-Zhong; WANG, Teng-Li y JI, Liang-Nian. Enhanced dye decolorization efficiency by citraconic anhydride-modified horseradish peroxidase. En: Journal of Molecular Catalysis. B, Enzymatic. January 2006. vol. 41, no. 3; p.81-86.
3. PRAMPARO, L. 2008. Tesis: Study of a torus bioreactor for the enzymatic elimination of phenol. Universitat Rovira I Virgili. Extraída el 20 de Marzo, 2010, de <http://www.tdx.cat/TDX-1124108-100126>.
4. SARATALE, R.G; Decolorization and biodegradation of textile dye Navy blue HER by *Trichosporon beigelii* NCIM-3326. En: Journal of Hazardous Materials. July 2009. vol.166, no. 2-3; p. 1421-1428.
5. KARIMINIAAE-HAMEDAANI, H.R.; SAKURAI, A. y SAKAKIBARA, M. Decolorization of synthetic dyes by a new manganese peroxidase-producing white rot fungus. En: Dyes Pigments. 2007. vol. 72; p.157-162.
6. KARAM, Jean y NICELL, James A. Potential application of enzymes in waste treatment. En: Journal of Chemical Technology & Biotechnology. June 1997. vol. 69, no. 2; p. 141-153.
7. OTEGA, M. 2001. Tesis: Eliminación de compuestos fenólicos mediante su polimerización catalizada por peróxidasa de nabo (*Brassica napus* L. var Purple top White globe). Universidad Autónoma de Querétano. México. Extraída el 22 de Diciembre, 2009.
8. OUNIGIPAT, W.; ALEXANDER, P.W. y SOUTHWELL-Keely, P.T. En: Anal. Chim. Acta. 1995; p. 309-35.
9. FLORIS. G.; MEDDA, R. y RINALDI, A.. Peroxidase from *Euphorbia characias* latex: purification and properties. En: Phytochemistry. 1984. No. 23; p. 953 - 956.
10. JENG, Fang-Yi y LIN, Sung-Chyr. Characterization and application of PEGylated horseradish peroxidase for the synthesis of poly (2- naphthol). En: Process Biochemistry. July 2006. vol. 4, no. 7; p. 1566-1573.
11. WRIGHT, H.; y NICELL, A. Characterization of soybean peroxidase for the treatment of aqueous phenols. En: Bioresource Technology. 1999; p. 70-69.
12. VAN HUYSTEE, R. B. Some molecular aspects of plant peroxidase biosynthetic studies. En: Journal of Plant Physiology. 1987. vol. 38; p. 205-219.

13. UNIVERSIDAD DE MURCIA. Enzima con actividad peroxidasa aislada de la alcachofa (*Cynara Scolymus*, L). Procedimiento para su aislamiento, purificación y aplicaciones. Inventor RODRIGUEZ, José Neptuno. Int. CL.: C12N 9/08. Fecha de solicitud 24, octubre, 2001. España, patente de investigación. EPI336 653 A1. 20, agosto, 2003.
14. ARRUDA, Selene et al. Toxicity of textile dyes and their degradation by the enzyme horseradish peroxidase (HRP). En: Journal of Hazardous Materials. 2007. vol. 147; p.1073-1078.
15. BEECH, W.F. Reactive dyes based upon triazines. En: Fibre reactive dyes. 2 ed. Imperial Chemical Industries Limited, Manchester, England: Logos Press limited. 1970; p. 81-157.
16. THE SOCIETY OF DYERS AND COLOURIST. En: Color Index. 3 ed. The American Association of textile Chemistry and Colourist. p 4678.
17. CORREA, Juan. y BARRERA, Carlos. En: Introducción al R. Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín – Colombia. Fondo Editorial ITM, 2010. p. 243 – 247.
18. R Development Core Team, 2011. R: A language and environment for statistical computing.
19. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL.
20. ALATON, A.A y KORNMULAR, M.R. Ozonation of spent reactive dye-baths effect of HCO₃/CO/U2-3 alkalinity. En: Journal. Environ. Eng. 2002. vol.128, p.686–696.
21. KLAGES, F. Tratado de química orgánica. Campos especiales. Editorial Reverté S.A, 1968. p. 143-146; Tomo III.
22. KENNETH, Rinehart. Oxidation and reduction of organic compounds. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1973. 168 p.
23. SOTO et al. Comparación en la decoloración del efluente proveniente de la industria textil de un municipio antioqueño empleando extracto de alcachofa con actividad peroxidasa y peróxido de hidrogeno. En: Producción + Limpia. Diciembre 2010. vol. 5, no. 2, p. 24-34.
24. BEECH, W. F. Identification of reactive dyes. En: Fibre reactive dyes. 2 ed. Imperial Chemical Industries Limited, Manchester, England: Logos Press limited, 1970; p. 331-157
25. ROBERTS, John y CASERIO, Marjorie. Basic Principles of Organic Chemistry. New York: W.A Benjamin in, Inc, 1964. p 692-696.
26. SILVA, Maria et al. Decolorization of the phthalocyanine dye reactive blue 21 by turnip peroxidase and assessment of its oxidation products. En: Journal of molecular catalysis B: Enzymatic. Accepted manuscript 12 de diciembre 2011. 25 p.