

Comportamiento de la remoción de colorantes y materia orgánica en un humedal subsuperficial. Efecto del suelo como sustrato

Dye and organic matter removal performance in a subsurface wetland.
Effect of soil as substrate

Maira María Pérez-Villar^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-3907-7449>

Margie Zorrilla-Velazco¹ <https://orcid.org/0000-0003-4248-6793>

Bárbaro Miguel Pescoso-Torres <https://orcid.org/0000-0003-1149-4352>

Yaribey Mayusca González-Roche¹ <https://orcid.org/0000-0003-0114-1270>

Centro de Estudio de Química Aplicada. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas,
Villa Clara, Cuba

* Autor para la correspondencia: mariapv@uclv.edu.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la cinética de remoción de dos colorantes y materia orgánica en un humedal subsuperficial experimental de 0,15 m² de área superficial, sembrado con la planta *Cyperus alternifolius* y con suelo pardo con carbonato y graba como sustrato. El estudio cinético realizado mostró una disminución de los contaminantes en el efluente del humedal desde los primeros minutos de contacto, ajustándose la remoción de materia orgánica al modelo cinético de saturación o Monod. Se obtuvieron eficiencias de remoción de los contaminantes superiores al 70 %. Se evaluó además el efecto del sustrato en la remoción de los colorantes, obteniéndose los modelos cinéticos y termodinámicos. Se obtuvo un mejor ajuste al modelo cinético de pseudosegundo orden para ambos colorantes, observándose una capacidad máxima de adsorción (0,01-0,58 g/kg) inferior a otros adsorbentes evaluados. Se obtuvo un buen ajuste tanto al modelo de Freundlich como al de Lagmuir.

Palabras clave: humedales subsuperficiales; remoción de colorantes; *Cyperus alternifolius*.

ABSTRACT

In the present research, the removal kinetics of two dyes and organic matter were evaluated in an experimental subsurface wetland of 0,15 m² of surface area, planted with the *Cyperus Alternifolius* plant and with brown soil with carbonate and gravel as substrate. The kinetic study showed a decrease of pollutants in the wetland effluent from the first minutes of contact, adjusting the removal of organic matter to the saturation or Monod kinetic model. Pollutant removal efficiencies of more than 70 % were obtained. The effect of the substrate on the removal of the dyes was also evaluated, obtaining the kinetic and thermodynamic models. A better fit to the pseudo-second order kinetic model was obtained for both dyes, observing a maximum adsorption capacity (0,01-0,58 g/kg) lower than other adsorbents evaluated. A good fit to both the Freundlich and Lagmuir models was obtained.

Keywords: subsurface wetlands; dyes removal; *Cyperus alternifolius*.

Recibido: 12/11/2021

Aprobado: 20/12/2021

Introducción

Con la aparición de las primeras poblaciones estables y el crecimiento de estas, la eliminación de los residuos comenzó a ser un inconveniente gracias a la necesidad de expeler tanto las excretas, como los restos de alimentación. Mientras la humanidad se ha ido desarrollando, con ella también lo ha hecho este problema, enriquecido por los avances tecnológicos e influenciados por la globalización que lleva a la producción y consumo desenfrenados, ignorándose muchas veces la repercusión que tienen en el ambiente los residuos de tanta elaboración. El amplio desarrollo industrial que se ha alcanzado hasta la actualidad ha contribuido con el vertimiento de grandes volúmenes de aguas residuales, poniendo en riesgo la biocompatibilidad de los recursos hídricos, pues una vez contaminados dañan y destruyen los ecosistemas del planeta.

La industria textil ha presentado problemas medioambientales vinculados, principalmente al uso y la gestión del agua. El impacto ambiental de sus efluentes líquidos es muy diverso, por la gran variedad de materias primas, reactivos colorantes, auxiliares y métodos de producción existentes en ellos. Dichos efluentes se caracterizan, generalmente, por su elevada Demanda Química de Oxígeno (DQO), debida a los compuestos orgánicos refractarios; Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), debida a la materia orgánica biodegradable, elevada temperatura, coloración intensa, pH inestable y sólidos en suspensión.⁽¹⁾

A diferencia de las aguas urbanas, en las que la mayoría de los compuestos orgánicos son fácilmente biodegradables, el tratamiento de las aguas industriales textiles puede complicarse por contener compuestos difíciles de degradar biológicamente. Por lo tanto, son muchos los casos en los que se requieren tratamientos más específicos y avanzados.

Una gran proporción de los colorantes empleados en el teñido de tejidos, no es directamente tóxica para los organismos vivos. Sin embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de descarga pueden llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en los cuerpos de agua, e implica un alto riesgo a la salud humana y al ecosistema, debido a que algunos de estos colorantes o sus subproductos son altamente tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos, haciendo necesario que su presencia sea controlada.⁽²⁾

Existen diferentes métodos para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil, dentro de los que se destacan, tratamiento con ozono, electrocoagulación, procesos fotocatalíticos, fenton/UV, entre otros. Estos métodos muestran una elevada eficiencia en la remoción de colorantes y DQO, sin embargo, presentan como desventajas la generación de lodos, el costo de operación y reactivos, y la obtención de subproductos solubles, usualmente más tóxicos.⁽³⁻⁴⁾

En estudios realizados por González *et al.*, (2016)⁽⁵⁾ y Domínguez *et al.*, (2018)⁽⁶⁾ fue comprobada la efectividad de los humedales subsuperficiales para la depuración de la materia orgánica y colorantes presente en los efluentes vertidos, por lo que constituyen una alternativa para complementar el tratamiento básico implementado en la industria textil. Por lo que se propone como objetivo evaluar el comportamiento de la remoción de colorantes y materia orgánica en humedales subsuperficiales, usando suelo como sustrato.

Materiales y métodos

Sistema experimental

El sistema experimental consistió en un humedal subsuperficial horizontal (figura 1) de 0,45 m de largo; 0,33 m de ancho y 0,2 m de profundidad con un área superficial de 0,15 m². El mismo posee una capa de suelo pardo con carbonato de 0,15 m de espesor y la capa restante de grava 5-10 mm de diámetro. Según plantean diversos autores, tanto la composición química del suelo como sus parámetros físicos, tienen una gran influencia en el sistema de tratamiento y en los humedales plantados el crecimiento de las raíces con agregados ayuda a descomponer la materia orgánica y prevenir la colmatación.^(7, 8, 9)

El humedal fue sembrado con la planta *Cyperus alternifolius*. La misma fue escogida por haber sido estudiada en nuestro país anteriormente, mostrando altos porcentajes de remoción de los contaminantes expuestos y elevada resistencia a condiciones adversas.^(5, 6, 10) Es una especie perenne, herbácea y se desarrolla bien bajo condiciones de estrés. Fueron tomadas en zonas aledañas a la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, fueron recolectadas, podadas y sembradas. La experimentación se comenzó al mes de sembradas las plantas, cuando ya presentaban un elevado grado de desarrollo, tanto en la parte aérea como en las raíces y rizomas, con una semana de aclimatación.



Fig. 1- Humedal subsuperficial a escala de laboratorio

Curva de calibración de cada colorante

Precisión de la longitud de onda de máxima absorción

Se preparó una disolución de 20 mg L⁻¹ de dos colorantes (627 negro y pardo o negro). Estos colorantes provienen de la industria “Lava Jeans” ubicada en la provincia de Tungurahua

cantón Ambato en Ecuador, dedicada al lavado y tinturado de jeans. Se realizó el barrido de exploración de las soluciones preparadas anteriormente desde 380 hasta 680 nm en un espectrofotómetro UV-VIS (Genesys Thermo Electron Corporation. USA), obteniéndose el espectro de absorción y la longitud de onda de máxima absorción para cada colorante.

Preparación de la curva de calibración

Se pesaron 0,0100 g de los colorantes 627 negro y pardo o negro en una balanza analítica (Denver Instrument SI-234, Alemanis) y se diluyó en 100 mL de agua destilada para obtener una solución problema de concentración 100 mg L⁻¹. Se prepararon los puntos de la curva con el volumen de patrón que se especifica en la tabla 1, y se enrasaron hasta 25 mL.

Tabla 1- Preparación de la curva de calibración

Colorantes 627 negro y pardo o negro	
V (mL)	C (mg L⁻¹)
1	4
2	8
5	20
7	28
10	40
13	52

Cinética y eficiencia de remoción en el humedal experimental

Se evaluó la remoción de dos colorantes en el humedal con soluciones patrones de concentraciones inicial cercanas al valor medio de las curvas de calibración, preparándose 5 L de cada colorante y haciéndose pasar por el humedal, recolectándose muestras a los 2; 4; 6; 8; 10; 13; 16; y 19 min de retención en el mismo.

Para estudiar la disminución del valor de DQO fue preparada un agua residual sintética, en la cual se mezclaron todas las materias primas empleadas en el proceso de producción de la industria “Lava Jeans”, además de los colorantes. Se determinó la concentración de DQO inicial, la que se corresponde, aproximadamente, con la concentración media emitida por la entidad (330 mg L^{-1}) y se tomaron muestras del efluente a los 2; 10; 40; 60; 90 y 120 min, respectivamente. Fueron realizadas 3 réplicas de cada uno de estos ensayos.

Para evaluar la eficiencia de remoción, se realizó la determinación de los contaminantes en el agua residual afluyente al humedal y en el agua residual efluente en el tiempo, tomando un tiempo de retención donde se logra una disminución significativa de los contaminantes (90 min para la DQO, 6 min para el colorante 627 negro y 2 min para el colorante pardo o negro).

Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La determinación se realizó por el método del dicromato según *Standard Methods 5220 B*.⁽¹¹⁾ Se basa en la oxidación de la materia orgánica en cantidades conocidas de dicromato de potasio de pureza analítica y ácido sulfúrico ($\rho = 1,84 \text{ g/mL}$). Esa mezcla se somete a reflujo por un tiempo de 2 h en presencia de sulfato de plata para análisis como catalizador y sulfato de mercurio de pureza analítica para eliminar las interferencias de cloruros, bromuros y yoduros.

Estudio de equilibrio termodinámico de la adsorción de colorantes en el suelo pardo con carbonato

Preparación del suelo

El suelo pardo con carbonato fue tomado a 20 cm de profundidad en zonas aledaña a la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, este suelo fue caracterizado por Pérez y colaboradores.⁽¹²⁾ Su preparación incluye primeramente un secado en la estufa (WTC BINDER, Alemania), a una temperatura de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 12 h. Posteriormente, fue reducido su tamaño con un mortero, seleccionando un tamaño de partículas por debajo de los 2 mm empleando un tamiz. Finalmente, el material fue almacenado en una desecadora para mantener controlada la humedad.

Cinética de adsorción de los colorantes en el suelo pardo con carbonato

Para la realización del experimento cinético se puso en contacto 1 g de suelo, con 50 mL de disoluciones de los colorantes 627 negro (31 mg/L) y pardo o negro (33 mg/L), a pH 6, por diferentes tiempos (1; 2; 3; 5; 7; 9; 12; 15; 25; 40 y 60 min). Todas las muestras fueron agitadas, con un agitador mecánico (IKA RW 20, Alemania) a una velocidad de 250 rpm, con control de temperatura, a dos temperaturas diferentes (25 °C y 35 °C), posteriormente fueron centrifugadas (centrifuga Heal Force, República Popular China) a una velocidad de 4 000 rpm, durante 15 min, seguidamente fue medida la absorbancia de cada muestra y la concentración de los colorantes fue determinada empleando la curva de calibración de cada uno. Fueron realizadas tres réplicas en todos los casos.

Capacidad de adsorción de los colorantes en el suelo pardo carbonato

La adsorción de la muestra se determinó con series experimentales, poniendo en contacto 1 g de suelo pardo carbonato, con 50 mL de soluciones de ambos colorantes a distintos niveles de concentración (10; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 55 y 60 mg/L), para el colorante 627 negro y (10; 15; 20; 25; 30; 35; 40 y 45 mg/L), para el colorante pardo o negro, a pH 6. Las muestras fueron agitadas por un tiempo de 2 min, con un agitador mecánico (IKA RW 20, Alemania) a una velocidad de 250 rpm, con control de temperatura, a dos temperaturas diferentes (25 °C y 35 °C); posteriormente fueron centrifugadas (centrifuga Heal Force, República Popular China) a una velocidad de 4 000 rpm, durante 15 min; seguidamente fue medida la absorbancia de cada muestra. Para obtener el ajuste de los datos experimentales a las isothermas de Langmuir y Freundlich, se utilizó la isoterma en su forma linealizada. Para el modelo de Langmuir; se ploteó $1/q$ contra $1/C_e$, y se ajustó a una regresión lineal usando el Software Excel. Similarmente se procedió con el modelo de Freundlich, ploteando $\log q$ contra $\log C_e$.

Resultados y discusión

Obtención de la curva de calibración de los colorantes

Primeramente, se realizó el barrido para obtener la longitud de onda de máxima absorción con menor interferencia del blanco para cada colorante (figura 2), obteniéndose para ambos 430 nm. Los valores medios (cinco réplicas) obtenidos para las curvas de calibración de los dos colorantes se muestran en la figura 3. Se realizó, además, la Prueba Q de Dixon para determinar valores atípicos. Los coeficientes de correlación mayores de 0,99 demuestran que no existen diferencias apreciables entre los valores experimentales de absorbancia obtenidos y los puntos de concentración de las curvas; por tanto, se puede afirmar que la correlación entre los datos es adecuada.

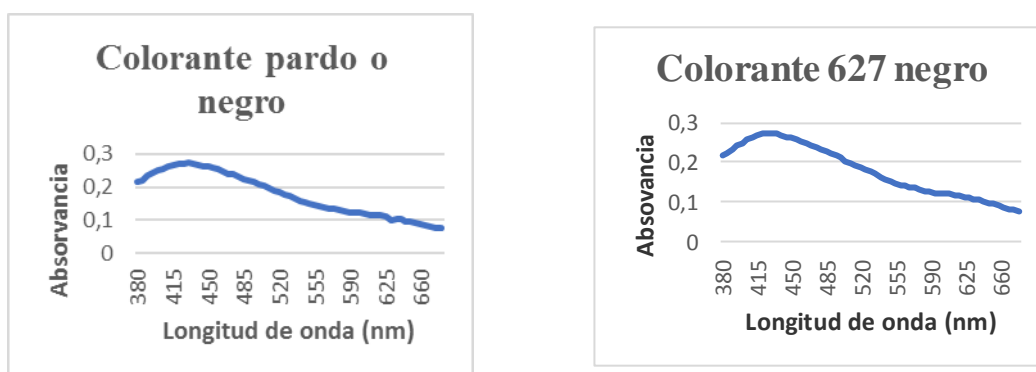


Fig. 2- Espectro de absorción de los colorantes

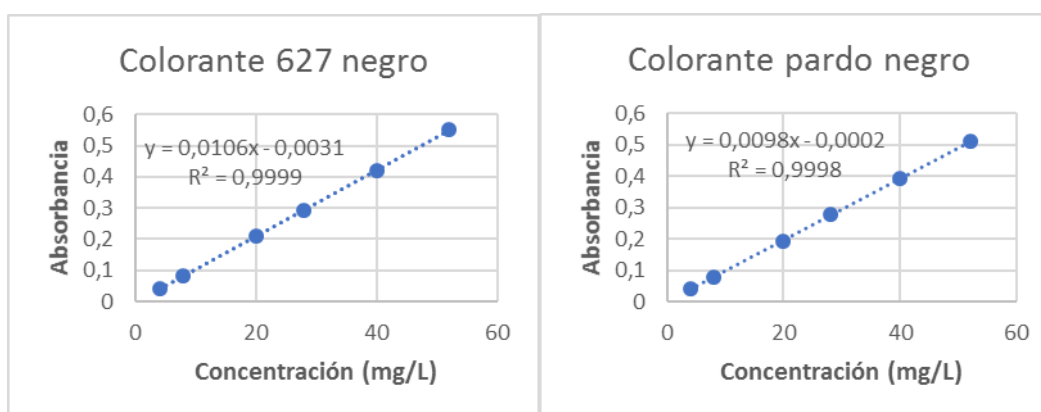


Fig. 3- Curvas de calibración de los colorantes

Evaluación de la cinética de remoción de colorantes y materia orgánica en el humedal experimental

Cinética de remoción de colorantes

Ambos colorantes muestran un comportamiento cinético similar (figura 4), se observa una disminución de la concentración de los mismos antes de los 5 min de tiempo de retención en el humedal. Este comportamiento muestra un ligero incremento a partir de los 12 min, aunque no supera la concentración de 8 mg L^{-1} de colorante, lográndose la remoción de este contaminante en tiempos de retención por debajo de los 10 min.

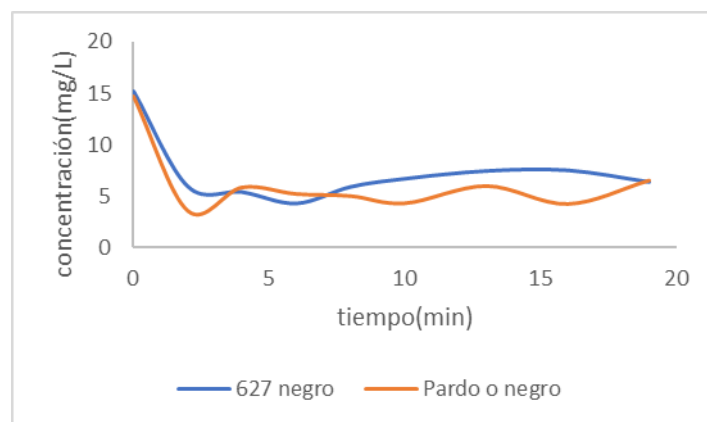


Fig. 4- Comportamiento cinético de la remoción de los colorantes en el humedal. Cinética de remoción de materia orgánica

A partir de los resultados obtenidos en la remoción de colorantes se procede a realizar la cinética de remoción de la materia orgánica, ya que las aguas residuales efluentes de la industria están compuestas por los diferentes productos orgánicos que se utilizan en el proceso de producción, dentro de los que se encuentran los colorantes. Los resultados obtenidos para el estudio cinético de la remoción de materia orgánica en el humedal experimental, a través de la determinación de la DQO, se muestran en la tabla 2. Como se observa, las tres réplicas realizadas presentan el mismo comportamiento, con una disminución de la DQO desde los primeros dos minutos de tiempo de retención del agua residual en el humedal. También se muestra una estabilización de la remoción a partir de los 90 min, siendo menos significativa la disminución de la DQO a partir de este tiempo. Los valores elevados de la desviación estándar están determinados por la preparación del agua residual sintética para cada experimento, donde el agua residual afluente no presenta la misma concentración de DQO.

Tabla 2- Resultados obtenidos para el estudio cinético de la remoción de materia orgánica

t(min)	DQO 1 (mg/L)	DQO 2 (mg/L)	DQO3 (mg/L)	Promedio	D.E
0	307,77	340,91	347,79	332,16	21,40
2	118,37	108,90	85,76	104,34	16,78
10	108,90	104,17	80,99	98,02	14,94
40	108,90	94,70	71,46	91,69	18,90
60	89,96	85,23	61,94	79,04	15,00
90	71,02	66,29	50,50	62,60	10,75
120	66,29	61,55	52,41	60,08	7,06

Se realizó el ajuste de estos datos determinados experimentalmente a los modelos cinéticos más reportados ^(13, 14, 15) para la remoción de contaminantes mediante humedales subsuperficiales.

1. Modelo de primer orden: es el modelo más utilizado para estimar la remoción de los contaminantes en estos sistemas.⁽¹⁵⁾
2. Modelo de saturación o Monod: según diferentes autores ^(13, 14), puede explicar el comportamiento cinético de primer orden para bajas concentraciones, y de cero orden para altas concentraciones.

La ecuación de la recta y el coeficiente de correlación para dichos modelos se muestran en la tabla 3, observándose un mejor ajuste al modelo de Saturación o Monod.

Tabla 3- Modelos cinéticos

Modelo cinético	DQO	
Primer orden	$\ln \frac{C_e}{C_0} = -0,05 * t - 1,1459$	$R^2 = 0,9605$
Saturación	$\frac{1}{t} \ln \frac{C_e}{C_0} = 0,046 * \left(\frac{C_e - C_0}{t} \right) - 0,0058$	$R^2 = 0,9999$

Las constantes obtenidas para la DQO a 30 °C, con el modelo de saturación o Monod, se reportan en la tabla 4. Estas constantes permiten el diseño de humedales subsuperficiales horizontales para la remoción de materia orgánica a mayor escala para las condiciones específicas en que fueron obtenidas, siendo de gran utilidad para el empleo de estos métodos naturales de tratamiento en industrias textiles.

Tabla 4- Constantes cinéticas para DQO A 30 °C

Constante de Saturación (K)	217,37 mg L ⁻¹
Constante cinética (k)	1,26 mg L ⁻¹ min ⁻¹

Evaluación de la eficiencia de remoción de colorantes y materia orgánica en el humedal experimental

Los valores medios (n=3) de la concentración de la solución afluyente y efluente, una vez alcanzada la estabilización en el tiempo y las eficiencias de remoción de color y DQO alcanzadas, se muestran en la tabla 5.

Tabla 5- Valores medios y eficiencia de la remoción de color y materia orgánica en el humedal experimental

	Color 627 negro	Color pardo o negro	DQO
C Afluyente (mg L ⁻¹)	15,20 ± 1,74	14,75 ± 0,62	332,16 ± 21,40
C Efluente (mg L ⁻¹)	4,35 ± 1,06	3,52 ± 0,33	62,60 ± 10,74
Eficiencia de remoción (%)	71,38	76,11	81,15

Se observa una disminución tanto del color como de la DQO en el humedal experimental, alcanzándose eficiencias de remoción superiores al 70 % para los dos colorantes y mayores de 80 % para la DQO en el humedal. En investigaciones realizadas por diversos autores ^(16, 17, 18) se obtuvieron eficiencias de remoción de estos contaminantes por encima del 70 %.

Evaluación del efecto del sustrato en la remoción de color

Cinética de remoción de color en el suelo pardo con carbonato

En la figura 6 se muestra el comportamiento cinético de la remoción de color para los dos colorantes evaluados a 25 °C y 35 °C. Se observa un comportamiento diferente para ambos colorantes, favoreciéndose la adsorción con la temperatura para el colorante 627 negro, y disminuyendo la misma con el incremento de la temperatura para el pardo o negro. Ambos colorantes presentan un máximo de adsorción antes de los 3 min, con una tendencia a la desorción a partir de los 5 min, lo que dificulta la implementación de procesos de absorción de estos colorantes en el suelo analizado.

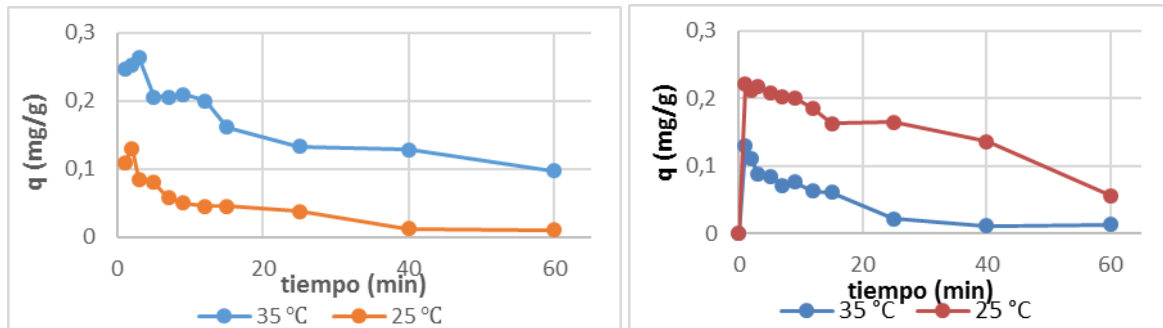


Fig. 6- Comportamiento cinético de la remoción de color, (a) colorante 627 negro (b) colorante pardo o negro

En la tabla 6 se muestra la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación para el modelo de pseudo segundo orden y el de Elovich, observándose un mejor ajuste al de pseudo segundo orden en todos los casos. Estos resultados están en correspondencia con lo reportado para diferentes sustratos y colorantes. ⁽¹⁹⁻²¹⁾

Tabla 6- Modelos cinéticos

	Colorante 627 negro		Colorante pardo negro	
	25 °C	35 °C	25 °C	35 °C
Pseudo segundo orden	$y = 0,010x + 6,73$ $R^2 = 0,93$	$y = 0,097x + 3,90$ $R^2 = 0,97$	$y = 0,136x + 1,96$ $R^2 = 0,99$	$y = 0,012x + 5,93$ $R^2 = 0,95$
Elovich	$y = -29,22x + 4,00$ $R^2 = 0,91$	$y = -19,59x + 6,01$ $R^2 = 0,94$	$y = -19,58x + 5,80$ $R^2 = 0,77$	$y = -31,3x + 4,26$ $R^2 = 0,94$

Estudio de equilibrio termodinámico de la adsorción de colorantes en el suelo pardo con carbonato

En la figura 7 se observa la representación gráfica de la isoterma de adsorción obtenida, en función de la variación de la adsorción con la concentración de adsorbato en la solución, a temperatura constante (25 y 35 °C) para ambos colorantes. En la misma se puede observar que se incrementó la adsorción del colorante 627 negro con la temperatura, no siendo así para el otro colorante, donde a 25 °C se observan valores de adsorción muy bajos. Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas para ambos colorantes entre las dos temperaturas evaluadas ($p = 0,03$ para el 627 negro, y $p = 0,01$ para el pardo negro).

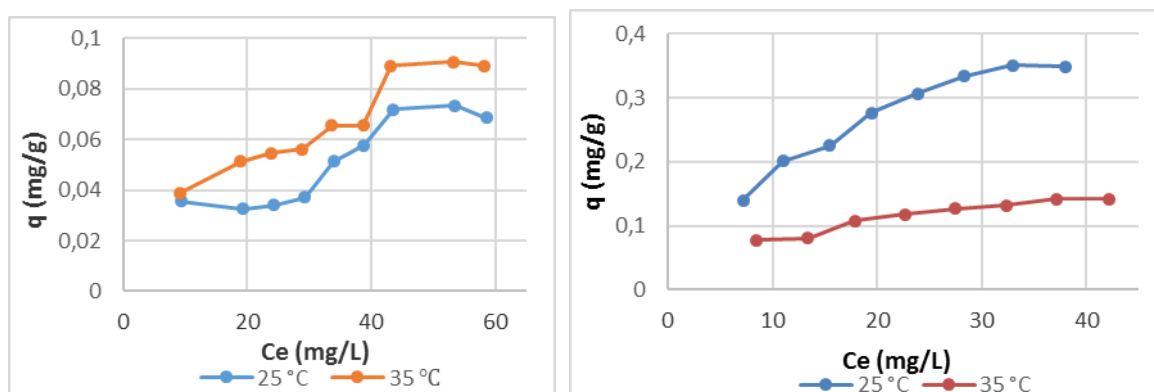


Fig. 7- Isotherma de adsorción, (a) colorante 627 negro (b) colorante pardo negro

Los resultados experimentales fueron procesados utilizando los modelos de isothermas de adsorción de Langmuir y Freundlich, los cuales han sido empleados por diferentes autores para el estudio de la adsorción de colorantes en disolución en suelos y sedimentos.⁽¹⁹⁻²²⁾ La ecuación de regresión de los modelos y los parámetros de los mismos se muestran en la tabla

7, donde se observa que ambos modelos reproducen los resultados experimentales. En los resultados reportados por diversos autores para adsorción de colorantes en diferentes sustratos, existe mayor coincidencia con el ajuste de los datos al modelo de Freundlich.⁽¹⁹⁻²³⁾

El suelo pardo con carbonato mostró una capacidad máxima de adsorción (0,01-0,58 g/kg) inferior a diferentes adsorbentes utilizados para la remoción de diversos colorantes.⁽¹⁹⁻²¹⁾ Estos resultados demuestran que el sustrato (suelo pardo con carbonato) no es el factor determinante en la remoción de estos colorantes en el humedal subsuperficial.

Tabla 7- Parámetros de los modelos de equilibrio

Colorante 627 negro					
Langmuir	T(°C)	Ecuación de regresión	R ²	q máx. (g/kg)	
	25	y = -1 122,90x + 72,02	0,91	0,013 9	
	35	y = 271,82x + 6,43	0,89	0,155 4	
Freundlich	T(°C)	Ecuación de regresión	R ²	k (L/kg)	1/n
	25	y = 0,84 x + 0,40	0,90	2,499	0,397 7
	35	y = 0,59x + 0,93	0,91	8,562	0,588 9
Colorante pardo negro					
Langmuir	T(°C)	Ecuación de regresión	R ²	q máx. (g/kg)	
	25	y = 38,04x + 1,71	0,99	0,584	
	35	y = 69,81x + 5,50	0,90	0,182	
Freundlich	T(°C)	Ecuación de regresión	R ²	k (L/kg)	1/n
	25	y = 0,56x + 1,70	0,97	49,591	0,560 9
	35	y = -31,3x + 4,26	0,94	30,047	0,425 9

Conclusiones

La mayor remoción de colorantes en el humedal experimental ocurre en los primeros 5 min de retención, observándose una tendencia a la desorción a partir de los 12 min. La remoción de materia orgánica en el humedal mostró el mejor ajuste al modelo cinético de saturación o Monod, obteniéndose las constantes cinéticas y de saturación, las que permiten el diseño de

estos sistemas de tratamiento. El humedal experimental mostró eficiencias de 70 % de remoción de color, y de 80 % de remoción de materia orgánica, demostrando las ventajas de estos métodos de tratamiento. Los valores de máxima capacidad de adsorción obtenidos para el suelo pardo con carbonato (0,01-0,58 g/kg) evidencian que el sustrato no juega un papel determinante en la remoción de color en el humedal.

Referencias bibliográficas

1. GURBUZ, F. *et al.* Treatment of textile effluents through bio-composite column: Decolorization and COD reduction. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019 **16** (12), 8653-8662. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02430-3>.
2. TKACZYK, A.; MITROWSKA, K. & POSYNIAK, A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of The Total Environment*, 2020 **717**, 137222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>.
3. AL-MAMUN, M. R. *et al.* (2019). Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019 **7** (5), 103248. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103248>.
4. PAŹDZIOR, K.; BILIŃSKA, L. & LEDAKOWICZ, S. A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 2019 **376**, 120597. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.057>.
5. DOMÍNGUES, L. *et al.* Evaluación de la remoción de colorantes mediante humedales subsuperficiales. *Revista Cubana de Química*, 2019 **31**, (1) 108-119. <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/4794>
6. GONZÁLEZ, Y. M. *et al.* Humedales subsuperficiales horizontales en la depuración de aguas oleosas. Cinética de remoción de DQO. *Afinidad*, 2016 **73** (573) 50-54. <https://core.ac.uk/download/pdf/39151846.pdf>.

7. VOHLAA, C. *et al.* Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Ecological Engineering*, 2011 **37**, (1) 70–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.08.003>.
8. WANG, Q. *et al.* Constructed Wetlands: A Review on the Role of Radial Oxygen Loss in the Rhizosphere by Macrophytes. *Water*, 2018 **10**, (6) 678-685. <https://doi.org/10.3390/w10060678>.
9. STOTTMEISTER, U. *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, 2003 **2**, (1-2) 93-117. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.010>.
10. GONZÁLEZ, Y. M. *et al.* Comportamiento de un humedal subsuperficial en la depuración de aguas oleosas. Cinética de remoción de DQO. *Revista Cubana de Química*, 2019 **31**, (3) 452-462. <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/5036>.
11. APHA, AWWA & WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st edn, Washington, DC. 2000. http://srjcestaff.santarosa.edu/~oraola/Assets/APHA_SM_20.pdf.
12. PÉREZ, M. M. *et al.* Caracterización de sustratos de filtros de suelo plantados. Influencia en la depuración de aguas residuales. *Afinidad*, 2011 **68** (552) 124-128. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3773339>.
13. MITCHELL, C. & MCNEVIS, D. Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetics. *Water Research*, 2001 **35** (5), 1295-1303. ISSN: 0043-1354. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00373-0](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00373-0).
14. SAEED, T.; SUN, G. Z. A comparative study on the removal of nutrients and organic matter in wetland reactors employing organic media. *Chemical Engineering Journal*, 2011 **171** (2) 439-47. ISSN: 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.101>.
15. SAEED, T.; SUN, G. Kinetic modelling of nitrogen and organics removal in vertical and horizontal flow wetlands. *Water Research*, 2011 **45** 3137–3152. ISSN: 0043-1354. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.031>.
16. SETHULEKSHMI, S.; CHAKRABORTY, S. Textile wastewater treatment using horizontal flow constructed wetland and effect of length of flow in operation efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021 **9** (6) 106379, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106379>.

17. MASI, F. *et al.* Lessons learnt from a pilot study on residual dye removal by an aerated treatment wetland. *Science of The Total Environment*, 2019 **648** 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.113>.
18. ONG, S. *et al.* Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland. *Journal of Hazardous Materials*, 2009 **165** (1-3) 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.071>.
19. FIGUEROA, D.; MORENO, A. & HORMAZA, A. Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías*, 2015 **14** (26) 105-119. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v14n26/v14n26a08.pdf>.
20. MOHAMAD, M. *et al.* Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 2011 **280** (1-3) 1-13. <https://doi:10.1016/j.desal.2011.07.019>.
21. OZDEMIRA, O. *et al.* Comparison of the adsorption characteristics of azo-reactivedyes on mezoporous minerals. *Dyes and Pigments*, 2004 **62** 49–60. <https://doi:10.1016/J.DYEPIG.2003.11.007>.
22. HAMD AOUI, O. Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar sawdust and crushed brick. *Journal of Hazardous Materials*, 2006 **135** 264-273. <https://doi:10.1016/j.jhazmat.2005.11.062>.
23. PRAJAPATI, S. S.; NAJAR, P. A.; TANGDE V. M. Removal of Phosphate Using Red Mud: An Environmentally Hazardous Waste By-Product of Alumina Industry. *Advances in Physical Chemistry*, 2016 **2016** (1-9). <https://doi.org/10.1155/2016/9075206>.

Conflicto de interés

Los autores expresan que no hay conflictos de intereses en el manuscrito presentado.

Contribución de los autores

Maira María Pérez Villar. Realizó el análisis de los resultados y la escritura del artículo.

Margie Zorrilla Velazco. Realizó la revisión del artículo.

Bárbaro Miguel Pescoso Torres. Realizó los experimentos de laboratorio y el procesamiento de los resultados.

Yaribey Mayusca González Roche. Realizó los análisis de DQO y colorantes, así como la preparación de las soluciones.