

# ADSORCIÓN DE COLORANTES PRESENTES EN AGUA MEDIANTE FIBRAS MODIFICADAS CON NANOPARTÍCULAS OBTENIDAS A PARTIR DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA TEXTIL

J.J. Serralta-Macias<sup>1</sup>, J. C. Tapia-Picazo<sup>1\*</sup>, A. P. Rosales Ibarra<sup>1</sup>, and D. Alcalá-Sánchez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes 20256, México.  
tapiajc65@yahoo.com.mx.

Afiliación (Arial 8, centrado): <sup>a)</sup> Nombre del CPI o IES, dirección postal; <sup>b)</sup> Nombre del CPI o IES, dirección postal; <sup>c)</sup> Nombre del CPI o IES, dirección postal y correo electrónico del autor de correspondencia.

**Resumen:** Este trabajo constituye un estudio preliminar sobre la evaluación de fibras de poliacrilonitrilo (PAN), modificadas con nanopartículas (NPs) de óxido de zinc (ZnO) y óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) en una concentración del 10 % p/p, como materiales adsorbentes de pigmentos en agua. Adicionalmente, se evaluó el efecto de la funcionalización de las fibras mediante un tratamiento con una solución de ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>).

Se implementó un diseño de experimentos Taguchi L<sub>12</sub> con dos niveles para identificar los factores principales que afectan la capacidad de adsorción de azul de metileno en fibras sintéticas compuestas, obtenidas a partir del reprocesamiento de residuos textiles acrílicos. Los resultados mostraron una capacidad de adsorción significativa, de aproximadamente 30 mg/g. Este desempeño destaca el potencial de este material compuesto reciclado para la remoción de colorantes.

## Introducción

Los pigmentos son una clase de compuestos orgánicos sintéticos ampliamente utilizados en la industria textil, farmacéutica, manufactura pesada entre otras [1]. Por esta razón, esta clase de compuestos de han convertido en los contaminantes más comunes en el medio ambiente y cuerpos de agua. La descarga de efluentes contaminados con pigmentos tiene un efecto negativo en el medio ambiente a pesar de tener pequeñas trazas de pigmento debido a su alta visibilidad a bajas pocas concentraciones llegando a interrumpir drásticamente los procesos de fotosíntesis de organismos acuáticos dañando los diferentes ecosistemas. Adicionalmente los pigmentos pueden ser tóxicos y

bioacumulables en organismos acuáticos y el cuerpo humano causando afectaciones como dermatitis, alergias, irritación en piel, cánceres, y daños al sistema reproductivo y riñones [2]. Por otro lado, en el contexto donde la contaminación ambiental derivada de los grandes volúmenes de residuos sólidos generados durante las actividades de la industria textil [3], [4], se han planeado diferentes estrategias para su reducción entre las cuales destaca el reciclaje de estos residuos para la obtención de filamentos textiles modificados con alto valor agregado

Residuos textiles recuperados de polímero acrílico fueron reprocesados mediante extrusión en húmedo para obtener fibras

recicladas base poliacrilonitrilo (r-PAN). Finalmente, se modificaron las fibras de r-PAN con nanopartículas (NPs) de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  a una concentración de 10 %p, así como también una funcionalización con solución de ácido fosfórico. Para establecer condiciones favorables de adsorción de azul de metileno utilizando fibras de r-PAN modificadas con NPs, se realizó un diseño de experimentos  $L_{12}^2$  con el objetivo de establecer las variables principales que afectan la capacidad de adsorción de los materiales obtenidos. Los resultados obtenidos mostraron capacidades de adsorción  $\approx 30.31$  mg/g de fibra a temperatura ambiente y pH alrededor de 6–7, siendo los principales factores que afectan la adsorción de pigmento, tratamiento con ácido fosfórico, concentración de pigmento, y tipo de NPs, en orden descendente de importancia.

## Parte experimental.

### Materiales

Azul de Metileno (AM, sigma Aldrich), fibra acrílica residual obtenida en industrias textiles locales (Aguascalientes, México), NN, Dimetil formamida (DMF, Sigma Aldrich), polvo nanométrico de  $\text{ZnO}$  (Sigma Aldrich) y polvo nanométrico de  $\text{TiO}_2$  (Sigma Aldrich). Se utilizó agua destilada para la preparación de las disoluciones con pigmento. ácidos fosfórico (Sigma Aldrich).

### Extrusión en húmedo

La hilatura de fibras compuestas de PAN/ $\text{ZnO}$  y PAN/ $\text{TiO}_2$  se realizó utilizando un equipo de hilatura en húmedo especial, compuesto por un baño de coagulación, varios baños de lavado y una unidad de secado. Las soluciones precursoras se extruyeron a temperatura ambiente a través de un filtro de acero inoxidable de malla 400 (37  $\mu\text{m}$ ) y una hilera con 470 orificios y un diámetro de orificio de 50  $\mu\text{m}$ . La hilera se sumergió en un baño

de coagulación que contenía una solución de DIW y DMF a temperatura ambiente para coagular los filamentos. Posteriormente, las fibras se lavaron en baños de agua, se secaron a 90 °C y se estiraron a una relación de estirado de 1:4.

### Tratamiento con ácido fosfórico (TAF)

1 g de fibras se sumergió en 30 mL de solución de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  al 5% V/V por 1.5 hr. Después, se lavaron las fibras con agua destilada con la finalidad de remover el ácido remanente. Después las muestras fueron secadas por 24hr.

### Determinación de capacidad de Adsorción

De acuerdo con el diseño de experimentos  $L_{12}$  se definieron parámetros como tipo de NPs ( $\text{ZnO}$  y  $\text{TiO}_2$ ) utilizadas para modificar las fibras, masa de las fibras (2 y 4 mg/mL) , uso de TAF (con y sin), concentración inicial de pigmento (20 y 40 ppm), pH (5 y 8) y temperatura (25 y 40°C) de la solución contaminada (Ver **Tabla 1**).

**Tabla 1.** Resumen de diseño de experimentos.

| FACTOR | DESCRIPCIÓN                     | N1           | N2             |
|--------|---------------------------------|--------------|----------------|
| A      | Tipo de fibra                   | Sin TAF      | Con TAF        |
| B      | Temperatura de solución (°C)    | 25           | 40             |
| C      | pH de solución                  | 5 - 6        | 7 - 8          |
| D      | Concentración de fibras (g/mL)  | 0.002        | 0.004          |
| E      | Tipo de NPs                     | $\text{ZnO}$ | $\text{TiO}_2$ |
| F      | Concentración de pigmento (ppm) | 20           | 40             |
| G      | Uso de lampara UV               | Sin          | Con            |
| H      | Tipo de recipiente              | Plástico     | Vidrio         |
| I      | Error 1                         | 1            | 2              |
| J      | Error 2                         | 1            | 2              |
| K      | Error 3                         | 1            | 2              |

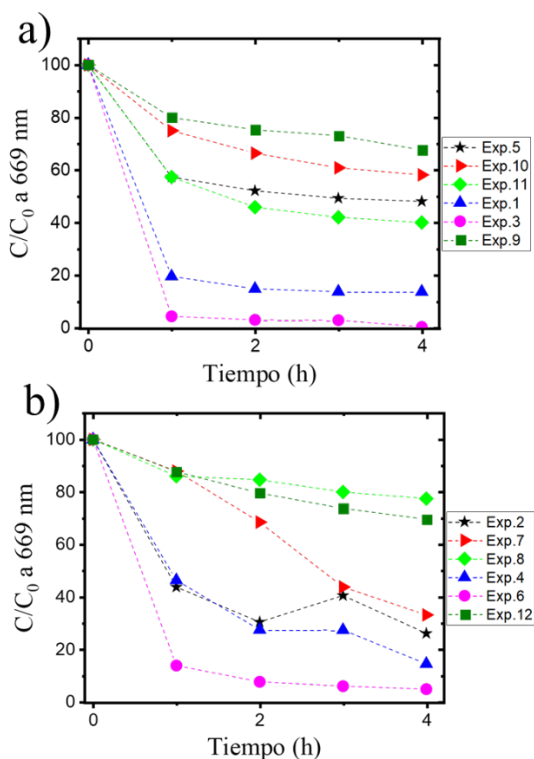
### Instrumentación.

Para la obtención de la curvas de calibración y evaluación de la eficiencia de adsorción de las diferentes muestras, se utilizó un

espectrofotómetro UV-vis (Thermo Scientific Genesys 10S UV-VIS).

## Resultados y discusión.

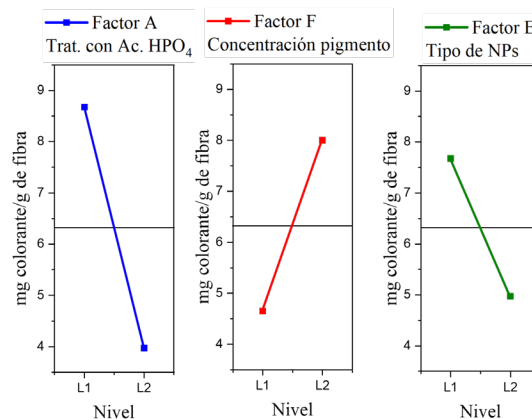
En la **Figura 1** se muestra la cinética de adsorción de azul de metileno por fibras acrílicas modificadas con NPs de ZnO y TiO<sub>2</sub> con y sin TAF e iluminación con luz UV.



**Figura 1.** Resultados de remoción de pigmento a) con y b) sin iluminación con radiación ultravioleta.

De acuerdo con el análisis ANOVA para la capacidad de adsorción de azul de metileno, se determinaron únicamente tres factores principales ( $F \geq 2$ ), como se observa en la **Fig. 2**. Se encontró que, para maximizar la capacidad de adsorción en las fibras compuestas obtenidas a partir de residuos acrílicos, son el uso de fibras modificadas con

NPs de ZnO sin TAF usando soluciones con alta concentración de pigmento (40 ppm).



**Figura 2.** Gráfica de efectos principales.

De acuerdo con el análisis ANOVA, ni el tratamiento de activación física con vapor de agua (TAF) ni la irradiación con luz ultravioleta mostraron una mejora significativa en la remoción del pigmento del agua. Específicamente, el TAF se emplea comúnmente en la funcionalización de fibras de carbono para mejorar la remoción de contaminantes en agua [5]. Sin embargo, en el caso de fibras poliméricas, la aplicación de este tratamiento ácido resultó contraproducente, ya que indujo una plastificación que redujo la porosidad de las fibras sintéticas.

Por otro lado, es bien conocido que el ZnO y el TiO<sub>2</sub> poseen propiedades fotocatalíticas [6], [7]. Estos semiconductores presentan brechas de energía prohibida típicas entre 3.0 y 3.3 eV[8], lo que permite la generación de portadores de carga al ser irradiados con luz UV. No obstante, el uso de recipientes de polipropileno y vidrio de borosilicato (Pírex) como reactores promovió la atenuación por absorción de la radiación UV incidente generada por la lámpara. En consecuencia, las fibras funcionalizadas con nanopartículas

(NPs) de ZnO y TiO<sub>2</sub> no exhibieron un efecto fotocatalítico estadísticamente significativo.

## Conclusiones.

La capacidad de adsorción del pigmento catiónico en las fibras con NPs de ZnO, fue significativamente alta, alcanzando valores de aproximadamente 30 mg/g. Esto sugiere que la afinidad intrínseca de la fibra y la superficie polar de las NPs de ZnO son factores clave en la retención del colorante.

El TAF, a diferencia de lo reportado en materiales como las fibras de carbono, no mejoró la adsorción en la fibra polimérica. Por el contrario, el tratamiento resultó en un ataque excesivo a la estructura, reduciendo la porosidad y, en consecuencia, la capacidad de adsorción del material.

## Agradecimientos.

Al proyecto TecNM M00-PR-03-R01 (23230) Convocatoria: Proyectos de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación. Fomento a la investigación y desarrollo tecnológico 2025.

Laboratorio nacional de investigación en nanociencias y nanotecnología (LINAM) IPICYT, en particular la M.C. Ana Iris Peña Maldonado.

## Referencias.

- [1] D. Nie *et al.*, "Preparation of ZnO-Incorporated Porous Carbon Nanofibers and Adsorption Performance Investigation on Methylene Blue," *ACS Omega*, vol. 7, no. 2, pp. 2198–2204, Jan. 2022, doi: 10.1021/acsomega.1c05729.
- [2] A. Labena *et al.*, "Grafting of acrylic membrane prepared from fibers waste for dyes removal: Methylene blue and congo red," *Separations*, vol. 8, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.3390/separations8040042.
- [3] D. Bhatia, A. Sharma, and U. Malhotra, "Recycled fibers: An overview," Jan. 2014.
- [4] İ. Özen, M. İ. Bahtiyari, O. Demiryürek, K. Shirvanimoghaddam, S. Ramakrishna, and M. Naebe, "Sustainable Production Applications on Textile-to-Textile Recycling of Pre-consumer Textile Waste in Light of Emerging Trends," *Fibers and Polymers*, vol. 26, no. 11, pp. 4691–4714, 2025, doi: 10.1007/s12221-025-01154-1.
- [5] D. I. Mendoza-Castillo, J. C. Tapia-Picazo, G. Manso-Tápanes, L. Palomino-Asencio, E. García-Hernández, and A. Bonilla-Petriciolet, "Surface properties of activated carbon fibers obtained from polyacrylonitrile and methyl acrylate: Experimental and simulation studies for lead and acid blue 25 dye adsorption from water," *J Mol Liq*, vol. 410, p. 125621, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.MOLLIQ.2024.125621.
- [6] A. Yar *et al.*, "Electrospun TiO<sub>2</sub>/ZnO/PAN hybrid nanofiber membranes with efficient photocatalytic activity," *RSC Adv*, vol. 7, no. 47, 2017, doi: 10.1039/c7ra03699j.
- [7] X. Cai, H. Wu, S. Hou, M. Peng, X. Yu, and D. Zou, "Dye-sensitized solar cells with vertically aligned TiO<sub>2</sub> nanowire arrays grown on carbon fibers," *ChemSusChem*, vol. 7, no. 2, 2014, doi: 10.1002/cssc.201301020.
- [8] I. Sanusi and C. B. Almquist, "ZnO/TiO<sub>2</sub> Composite Thin-Film Photocatalysts for Gas-Phase Oxidation of Ethanol," *Catalysts*, vol. 13, no. 8, 2023, doi: 10.3390/catal13081203.