

Julia Liliana Rodríguez Santillán¹, Ricardo Santillán Pérez², Iririana Martínez Sánchez³

RESUMEN

Las películas delgadas funcionales, como las basadas en polivinilpiridinas (PVP), ofrecen soluciones innovadoras en áreas como protección solar, eficiencia energética y tratamiento de agua. En particular, combinadas con óxidos metálicos como óxidos de zinc y titanio (ZnO y TiO₂), las PVP forman películas fotoactivas capaces de degradar contaminantes orgánicos mediante fotocatalisis. En estudios recientes, películas de P(4-VP)-ZnO eliminaron hasta el 81% del colorante anaranjado de metilo, gracias a su estructura homogénea y eficientes interacciones moleculares. Estas películas son fáciles de recuperar y reutilizar, superando limitaciones de los métodos convencionales. Además de su eficacia en tecnología ambiental, tienen aplicación potencial en dispositivos inteligentes, sensores y ventanas electrocrómicas, posicionándose como materiales clave frente a problemas de contaminación y cambio climático.

Vinilpiridinas: la maravilla de las películas fotoactivas

Cuando hablamos de “películas” en la vida cotidiana, muchas veces pensamos en entretenimiento; sin embargo, en el ámbito científico, las películas también hacen referencia a capas delgadas de materiales con propiedades funcionales. Estas películas, aunque invisibles o casi imperceptibles por su grosor micrométrico, tienen aplicaciones tecnológicas que van desde la protección de superficies hasta el tratamiento ambiental. Su diseño, funcionalización y nuevas combinaciones con nanomateriales están marcando una revolución silenciosa en diversos campos, en especial en el tratamiento de agua contaminada. En este contexto, las PVP surgen como una plataforma prometedora para la creación de películas fotoactivas con aplicaciones ambientales y tecnológicas.

¿Qué son las películas funcionales y por qué importan?

Las películas son materiales finos, muchas veces translúcidos, que se colocan sobre superficies para modificarlas o protegerlas. Son parte integral de la vida moderna: se usan en vidrios de automóviles y ventanas de edificios para bloquear radiación ultravioleta, en pantallas de celulares para prevenir rayaduras, o como capas de seguridad frente a robos o accidentes (Figura 1). Una innovación reciente en esta área son las ventanas inteligentes o electrocrómicas, que cambian de color al aplicar una corriente eléctrica. Estas permiten regular la entrada de luz y calor, y pueden ser controladas incluso mediante dispositivos remotos. Su incorporación en edificaciones ha demostrado potencial para reducir el consumo energético, en especial en iluminación y climatización. De hecho, se estima que los edificios consumen hasta un 40% de la energía global.

¹Laboratorio de Investigación en Ingeniería Química Ambiental, ESQIE-IPN; ²Laboratorio de Polímeros, ESQIE-IPN; ³BIOFLEX Empaques flexibles

¹jlrodriguez@ipn.mx, ²rsantillanp@ipn.mx, ³iririana@gmail.com



Figura 1. Ejemplos del uso de películas de polímero en la vida cotidiana. Fuente: elaboración propia.

Las películas también pueden tener usos ambientales importantes. Una aplicación emergente de gran interés es su incorporación en sistemas de tratamiento de agua, una necesidad urgente considerando la escasez y contaminación de este recurso, acentuada por el cambio climático.

El desafío del agua contaminada y la necesidad de nuevos materiales

En México, los efectos del cambio climático se manifiestan en sequías extremas, inundaciones y hundimientos del suelo. La disponibilidad de agua limpia es cada vez más crítica, y el tratamiento de aguas contaminadas es una prioridad. Las aguas residuales pueden contener contaminantes como colorantes sintéticos, metales pesados, microplásticos, virus, bacterias, residuos farmacéuticos y pesticidas.

Tradicionalmente, se han usado materiales adsorbentes como el carbón activado u óxidos metálicos, pero tienen desventajas: baja capacidad de adsorción, escasa posibilidad de ajuste funcional, difícil reciclaje y una eficiencia limitada al solo transferir los contaminantes de una fase a otra. Una alternativa mucho más eficaz son los procesos de oxidación avanzada (POAs). Estos sistemas generan radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), moléculas altamente reactivas que degradan contaminantes orgánicos hasta transformarlos en CO₂, agua y sales. Aunque altamente efectivos, muchos de los materiales utilizados en POAs se presentan en forma de polvo, lo que complica su recuperación y reutilización.

En este contexto, los materiales en forma de películas se presentan como una opción prometedora. No sólo son más fáciles de manejar y recuperar, sino que también permiten una aplicación directa y sostenida sobre flujos de agua o superficies contaminadas.

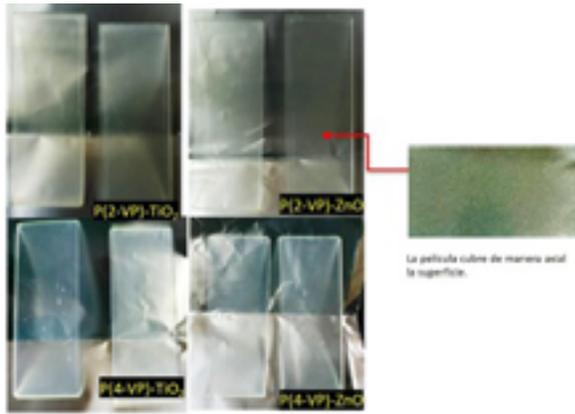


Figura 2. Películas obtenidas mediante la síntesis con vinilpiridina y un óxido metálico. Fuente: elaboración propia.

Polivinilpiridinas: estructura, propiedades y potencial

Las PVP son polímeros derivados de la piridina, que tienen un amplio uso en aplicaciones electrónicas, sensores, liberación controlada de fármacos y adsorción de contaminantes. Existen principalmente dos tipos: poli(2-vinilpiridina) (P(2-VP)) y poli(4-vinilpiridina) (P(4-VP)), dependiendo de la posición en la que se une el grupo vinil al anillo aromático de piridina.

Una característica fundamental de las PVP es la presencia de átomos de nitrógeno en su estructura, los cuales permiten interacciones de tipo iónico, coordinaciones con metales y formación de enlaces por puentes de hidrógeno. Además, pueden ser cuaternizadas (es decir, modificadas para adquirir carga eléctrica), lo que las vuelve eficaces en la eliminación de contaminantes aniónicos como cromatos o arseniatos.

Además de sus propiedades químicas, las PVP también presentan ventajas eléctricas. Han sido utilizadas como matrices conductoras en sensores electroquímicos y en la mejora de electrodos para baterías. Su estructura favorece la transferencia de carga y las reacciones redox, lo que las vuelve atractivas para aplicaciones de fotocatalisis ambiental.

Películas de PVP con semiconductores para tratamiento de agua

En el Laboratorio de Investigación en Ingeniería Química Ambiental (LAIQA) de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE), se ha trabajado en el desarrollo de películas compuestas de PVP con materiales semiconductores, en especial óxido de titanio (TiO_2) y óxido de zinc (ZnO) (Figura 2). Ambos materiales son conocidos por su capacidad fotocatalítica: al ser irradiados con luz, generan especies reactivas que oxidan contaminantes en agua.

Para fabricar estas películas, se usó la técnica de deposición por centrifugado (spin-coating), la cual permite obtener películas delgadas, homogéneas y bien adheridas. La polimerización se hizo en solución para facilitar la incorporación de las nanopartículas inorgánicas dentro de la matriz polimérica.

Las nanopartículas de TiO_2 tienden a formar agregados y generar grietas en las películas de P(2-VP), lo que podría limitar su eficacia. En contraste, las películas de P(4-VP)- ZnO mostraron una distribución uniforme de los agregados, sin formación de grietas. Esta estructura más homogénea favorece la interacción entre el semiconductor y el contaminante, así como la transmisión de electrones durante el proceso fotocatalítico.

Evaluación en la remoción del anaranjado de metilo

Para evaluar la eficacia de estas películas, se eligió el colorante anaranjado de metilo (AM) como contaminante modelo. Este compuesto es común en la industria textil, alimentaria, farmacéutica y papelería. Aunque se use en concentraciones bajas, tiene un alto impacto ambiental, ya que reduce la penetración de luz en cuerpos de agua, afectando la fotosíntesis acuática y disminuyendo el oxígeno disuelto.

En pruebas realizadas bajo irradiación, la película de P(4-VP)- ZnO logró eliminar el 81% del anaranjado de metilo en sólo cinco horas (Figura 3). Esta alta eficiencia se atribuye a la buena dispersión del ZnO , así como a la interacción intermolecular entre las cadenas poliméricas y las nanopartículas. Es probable que los pares de electrones libres del nitrógeno en la piridina formen enlaces por puentes de hidrógeno con la superficie hidratada del ZnO , creando canales de transferencia de carga más eficientes. Por otro lado, en el caso de P(2-VP), la posición del átomo de nitrógeno dificulta dichas interacciones.

Un beneficio adicional de este sistema es la facilidad de recuperación de la película, lo que la hace reutilizable y práctica para aplicaciones a mayor escala.

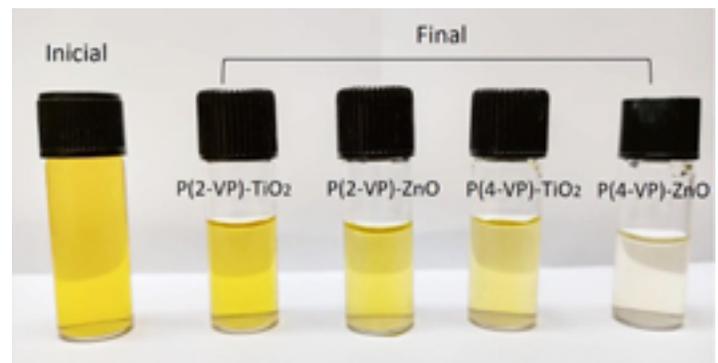


Figura 3. Decoloración del AM en presencia de las películas compuestas de PVP y un óxido metálico. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones y perspectivas

El desarrollo de películas compuestas de polivinilpiridinas con óxidos metálicos representa un avance importante en la búsqueda de materiales eficientes, accesibles y sostenibles para el tratamiento de agua contaminada. Estas películas no sólo eliminan colorantes tóxicos como el anaranjado de metilo, sino que pueden ser optimizadas para atacar una gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Gracias a su alta eficiencia, estabilidad, facilidad de recuperación y potencial de reutilización, las películas fotoactivas de PVP- ZnO ofrecen una alternativa real frente a los métodos tradicionales de tratamiento. Además, su versatilidad abre la posibilidad de aplicaciones futuras en sensores, electrodos avanzados, ventanas inteligentes y tecnologías híbridas con inteligencia artificial.

El reto ahora es continuar perfeccionando su síntesis, mejorar su durabilidad, explorar su escalabilidad industrial y evaluar su efectividad frente a mezclas complejas de contaminantes. Con estos avances, las películas basadas en polivinilpiridinas podrían convertirse en una herramienta clave dentro del arsenal tecnológico para enfrentar la crisis del agua y avanzar hacia un desarrollo más sostenible.