

Síntesis de fotocatalizadores activos a la radiación visible y aplicación en película delgada

Azael Martínez De la Cruz, Sergio A. Obregón Alfaro,
Enrique M. López Cuéllar, Karen H. Lozano Rodríguez
Posgrado de Materiales, FIME-UANL
azael70@yahoo.com.mx

RESUMEN

Los molibdatos $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ y $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ fueron sintetizados mediante la técnica de coprecipitación. Ambos óxidos fueron evaluados como fotocatalizadores en la degradación del colorante rodamina B. El óxido $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ mostró la mayor actividad fotocatalítica con un 86 % de mineralización del contaminante después de 100h de irradiación con luz visible. Con el objetivo de acercarse a una aplicación tecnológica, fueron desarrolladas películas delgadas de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ mediante un proceso secuencial de evaporación/descomposición en un Sistema de Evaporación Térmica (TES). La película formada de 200 nm de espesor del óxido $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ mostró actividad fotocatalítica para la degradación de rodamina B bajo radiación de luz visible.

PALABRAS CLAVE

Fotocatálisis heterogénea, $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, molibdatos, película delgada.

ABSTRACT

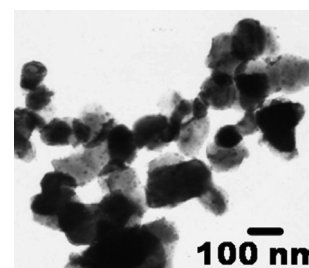
The molybdates $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ and $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ were synthesized by coprecipitation technique. Both oxides were tested as photocatalysts in the degradation of the rhodamine B dye. The $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ oxide showed the highest photocatalytic activity with a mineralization of 86 % of the dye after 100h of irradiation with visible light. In order to approach a technological application, thin films of $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ were developed by a decomposition/evaporation sequential process in a Thermal Evaporation System (TES). The film thickness of 200 nm of the $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ oxide showed photocatalytic activity for degradation of rhodamine B under visible light radiation.

KEYWORDS

Heterogeneous photocatalysis, $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, molybdates, thin films.

INTRODUCCIÓN

De entre los múltiples retos que como sociedad estamos enfrentando, el suministro de agua para actividades humanas ocupa un lugar preponderante. La actividad industrial demanda grandes cantidades de agua y frecuentemente



Artículo basado en el proyecto “Fotocatálisis heterogénea como herramienta tecnológica para la purificación de aguas residuales: caracterización fotocatalítica de molibdatos de bismuto activos a la radiación visible y aplicación en película delgada”, por el cual obtuvo el Premio de Investigación UANL 2010, en la categoría de Ingeniería y Tecnología, otorgado en la Sesión Solemne del Consejo Universitario de la UANL, celebrada el 10 de septiembre de 2010.

la desecha acompañada de sustancias tóxicas que afectan la flora y fauna acuáticas, dificultando su uso para actividades de riego y alejándola de una calidad cercana a la potabilidad. Lo anterior conlleva a la destinación de importantes recursos económicos y energéticos para la descontaminación y tratamiento de aguas residuales, descuidando así el apoyo a otras necesidades básicas de la población.

La mayor dificultad en el tratamiento de dichas descargas es debida a la ineficiencia de los procesos físicos tales como coagulación y adsorción, dado que sólo transfieren los contaminantes del agua residual a otro medio provocando una contaminación secundaria.¹ Estos mecanismos, además de resultar imprácticos, requieren etapas adicionales para la recuperación de los residuos y una posterior calcinación de los mismos con un consecuente aumento en los costos del proceso.

La presente investigación pretende atacar un punto esencial para el desarrollo de la humanidad: el tratamiento de aguas residuales para preservar una alta calidad del medio ambiente. Hasta hace poco, bastaba que este proceso de purificación de agua fuera viable técnicamente, aplicable a gran escala y en gran medida, económico. Sin embargo, en tiempos modernos debemos incorporar la sustentabilidad del mismo a cualquier propuesta que pretenda atacar esta problemática. En este sentido, la fotocatalisis heterogénea cumple con todos estos requisitos para ser considerada como una tecnología de vanguardia acorde a los tiempos actuales. La sustentabilidad de la fotocatalisis heterogénea se basa en el empleo de óxidos semiconductores cerámicos (no tóxicos) y energía solar (energía gratuita).

La fotocatalisis heterogénea es un proceso que se basa en utilizar un sólido semiconductor (normalmente de banda ancha) que es capaz de absorber directa o indirectamente energía radiante (visible o UV) igual o superior a su banda de energía prohibida. Cuando un fotón con esta energía incide sobre el semiconductor se promueve un electrón (e^-) de la banda de valencia (BV) hacia la banda de conducción (BC), generándose un hueco (h^+) en la primera banda. Los electrones que llegan a la banda de conducción pueden desplazarse dentro de la red del semiconductor. Asimismo, también se desplazan los lugares vacíos que han dejado en

la banda de valencia. Los electrones y los huecos fotogenerados pueden seguir diferentes caminos, como se muestra en la figura 1. La formación del par hueco-electrón y la migración de estas especies a la superficie del fotocatalizador, permite que se lleven a cabo reacciones de óxido-reducción en la superficie del fotocatalizador donde participan especies contaminantes adsorbidas.

El presente trabajo de investigación busca contribuir al desarrollo del conocimiento científico del área y, más allá de experimentos modelo de laboratorio, dar un paso hacia la aplicación tecnológica en película delgada. Para esto, hemos propuesto los molibdatos γ - Bi_2MoO_6 y α - $\text{Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ como fotocatalizadores activos visibles para la degradación de colorantes orgánicos utilizados en industrias como la textil, de cosméticos, de alimentos y fármacos.²

En términos generales, la parte medular del trabajo está estructurada en 3 partes: una parte exploratoria para identificar la existencia de actividad fotocatalítica en los óxidos propuestos, una segunda donde se utilizan rutas alternas de síntesis de los óxidos con la finalidad de potenciar su actividad fotocatalítica y, una tercera donde se encamina el trabajo hacia una aplicación tecnológica mediante la deposición del fotocatalizador en forma de película delgada.

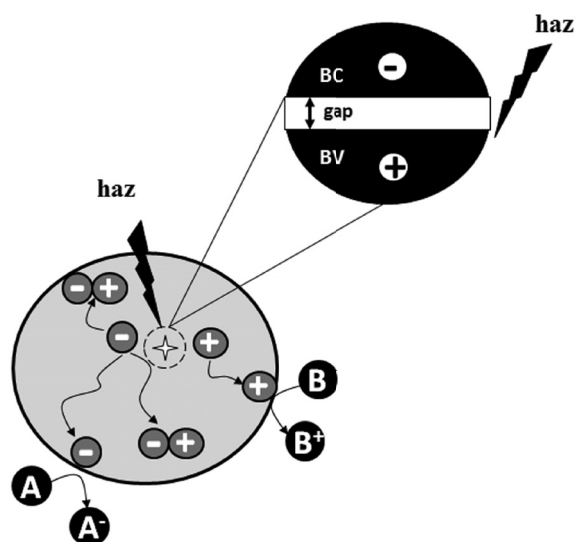


Fig. 1. Esquema de la formación de pares hueco-electrón en un semiconductor por acción de radiación electromagnética y proceso de recombinación de cargas.

EXPERIMENTAL

Preparación de polvos policristalinos

Los óxidos γ -Bi₂MoO₆ y α -Bi₂Mo₃O₁₂ fueron preparados por el método cerámico tradicional y mediante la técnica de coprecipitación. La síntesis por el método cerámico tradicional consistió en el pesado estequiométrico de los óxidos Bi₂O₃ y MoO₃. Dichos óxidos fueron mezclados y homogeneizados en un mortero de ágata con ayuda de acetona. La mezcla fue transferida a un crisol de porcelana y calcinada a 550°C durante 96 horas para el caso de γ -Bi₂MoO₆ y a 700°C por 24 horas para la preparación de α -Bi₂Mo₃O₁₂.

Por otro lado, la preparación de los óxidos por coprecipitación se llevó a cabo mediante la adición estequiométrica de una solución de Bi(NO₃)₃•5H₂O a una segunda solución acuosa que contenía la cantidad estequiométrica de (NH₄)₆Mo₇O₂₄•4H₂O para preparar el respectivo molibdato de bismuto. Durante el proceso de coprecipitación, el pH de las dispersiones resultantes fue ajustado con NH₄OH a 3 y 9 para la síntesis de γ -Bi₂MoO₆ y α -Bi₂Mo₃O₁₂, respectivamente. La dispersión resultante fue mantenida en un baño de agua a 70°C favoreciendo una lenta evaporación del solvente, hasta la formación de sólidos, los cuales fueron usados como precursores de los molibdatos de bismuto.

Los óxidos γ -Bi₂MoO₆ y α -Bi₂Mo₃O₁₂ fueron obtenidos mediante la descomposición térmica de los precursores. La fase γ -Bi₂MoO₆ fue sintetizada mediante calcinación a 450°C con una velocidad de calentamiento de 5°C•min⁻¹, manteniendo la muestra a dicha temperatura durante 20 horas.³ Para el caso de α -Bi₂Mo₃O₁₂, el precursor obtenido fue calcinado a 250, 300, 400 y 480°C con una velocidad de calentamiento de 5°C•min⁻¹, manteniendo las muestras a dichas temperaturas durante 20 horas.

Preparación de película delgada

El óxido γ -Bi₂MoO₆ fue seleccionado para estudiar su actividad fotocatalítica en película delgada. La película delgada del óxido γ -Bi₂MoO₆ fue preparada mediante evaporación térmica en condiciones de vacío. Para este propósito, polvos policristalinos del óxido obtenidos por el método cerámico tradicional fueron utilizados como reactivo de partida. La evaporación térmica de γ -Bi₂MoO₆

fue realizada en un Sistema de Evaporación Térmica (TES) Ámod 204 desarrollado por la compañía Angstrom Engineering. El óxido γ -Bi₂MoO₆ fue colocado en un crisol metálico que fue a su vez conectado en un circuito eléctrico del TES. La presión dentro de la cámara fue disminuida hasta 2x10⁻⁶ Torr. Con la finalidad de evitar una abrupta evaporación del óxido se utilizó una lenta velocidad de depósito del orden de 1.2 Ås⁻¹.

Caracterización y actividad fotocatalítica de muestras

La caracterización de los molibdatos γ -Bi₂MoO₆ y α -Bi₂Mo₃O₁₂; así como de la película delgada de γ -Bi₂MoO₆, fue llevada a cabo mediante las técnicas de difracción de rayos-X en polvo (DRX), microscopía electrónica de transmisión y barrido (TEM/SEM), espectroscopía de reflectancia difusa (DRS) e isoterms de adsorción-desorción de N₂ (área BET). Como modelo de reacción fotocatalítica se utilizó la degradación del colorante orgánico rodamina B (rhB) en medio acuoso. Para este propósito se dispersó el fotocatalizador en forma de polvo en la solución del colorante. En el caso del experimento realizado con el fotocatalizador en forma de película delgada, se desarrolló un método para evaluar la actividad del fotocatalizador bajo estas condiciones experimentales.⁴

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las muestras calcinadas fueron caracterizadas estructuralmente mediante difracción de rayos-X en polvo. Los difractogramas obtenidos mostraron la presencia de las fases γ -Bi₂MoO₆ y α -Bi₂Mo₃O₁₂ sin ninguna impureza de acuerdo a las tarjetas JCPDS 084-0787 y 021-0103, respectivamente. En particular, la temperatura óptima de síntesis de γ -Bi₂MoO₆ fue ubicada en 450°C, mientras que en el caso de α -Bi₂Mo₃O₁₂ fue posible la obtención del óxido en el intervalo de 250-480°C.

La morfología del óxido γ -Bi₂MoO₆ fue observada mediante TEM y SEM, como se observa en la figura 2. De acuerdo al análisis realizado por TEM la muestra presentó una morfología irregular, observándose partículas de tamaño incluso superior a los 300 nm. Este fenómeno es común en materiales preparados por coprecipitación, dado que esta técnica no provee

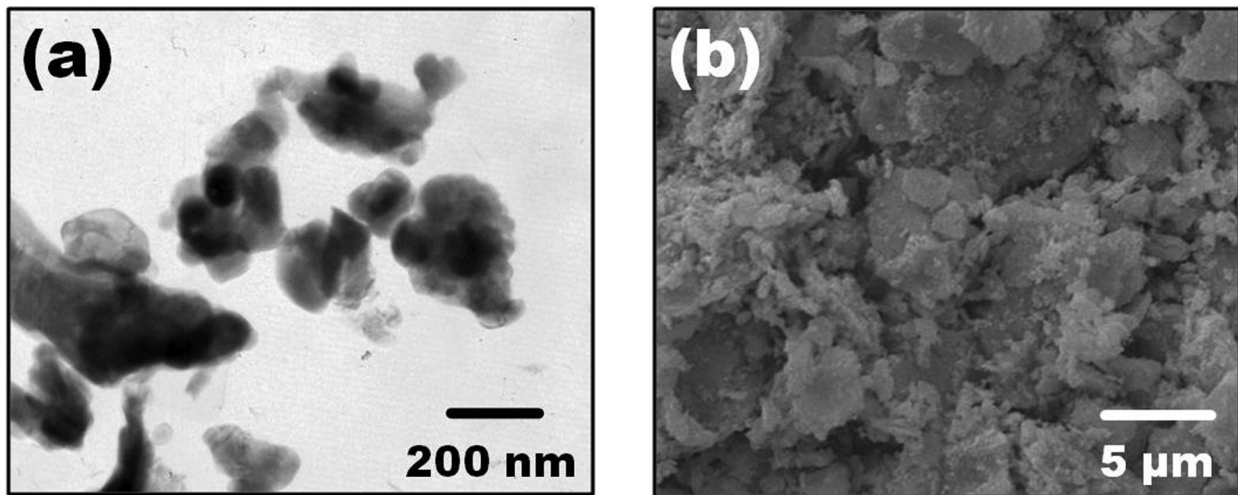


Fig. 2. Morfología de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ preparado mediante coprecipitación: (a) TEM; (b) SEM.

una formación controlada del material, conduciendo al crecimiento y agregación de las partículas.

Asimismo, la caracterización morfológica de las distintas muestras de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ calcinadas en el intervalo de 250-480°C se llevó a cabo mediante TEM. Cuando el precursor producto de la coprecipitación fue calcinado a 250°C, la fase $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ obtenida presentó una morfología homogénea de nanoplatos rectangulares cuyas dimensiones fueron de 50 nm de ancho y 200 nm de largo tal como observa en el inciso (a) de la figura 3.

A temperaturas mayores de calcinación como fue 300°C, la morfología de las partículas comenzó a cambiar propiciando formas semiesféricas, sin embargo con el predominio de los platos rectangulares anteriormente descritos (inciso b).

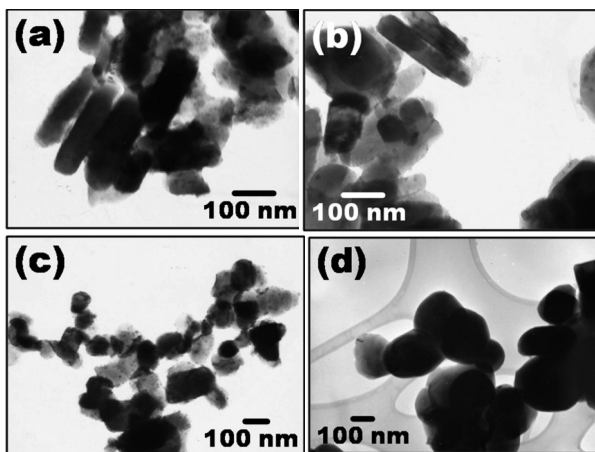


Fig. 3. Morfología por TEM de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ preparada mediante coprecipitación y calcinada a (a) 250°C; (b) 300°C; (c) 400°C; (d) 480°C.

La presencia de dichas partículas semiesféricas se mantuvo cuando la muestra fue calcinada a 400°C (inciso c) no observándose la presencia de los platos rectangulares. Cuando la muestra fue calcinada a 480°C se observó un cambio significativo en la morfología presentándose partículas elipsoides, producto del proceso natural de sinterización del óxido cerámico. Asimismo, se encontraron partículas aisladas con tamaños que oscilan entre 500 a 700 nm, indicando la existencia de un paso crítico de sinterización entre 400-480°C (inciso d).

De acuerdo a los espectros de reflectancia difusa (DRS), se calcularon valores de E_g de 2.44 eV para el óxido $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ obtenido por coprecipitación y de 2.51 eV para la muestra obtenida por el método cerámico tradicional. Con respecto a las distintas muestras de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ obtenidas por la técnica de coprecipitación, éstas presentaron un marcado desplazamiento hacia longitudes de onda más cortas con respecto al material de referencia (700°C), véase figura 4. Dicho fenómeno, al igual que el caso de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, puede ser asociado a pequeñas cantidades amorfas presentes en el material sintetizado como se ha descrito para otros óxidos.⁵ Del análisis de los datos obtenidos se estimaron valores de E_g de 2.74 eV (250°C), 2.82 eV (300°C), 2.79 eV (400°C), 2.77 eV (480°C) y de 2.45 eV para la muestra de referencia.

El área superficial de las muestras preparadas por coprecipitación fue determinada mediante el método BET utilizando los valores obtenidos a partir de sus respectivas isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno. Los valores obtenidos de área superficial

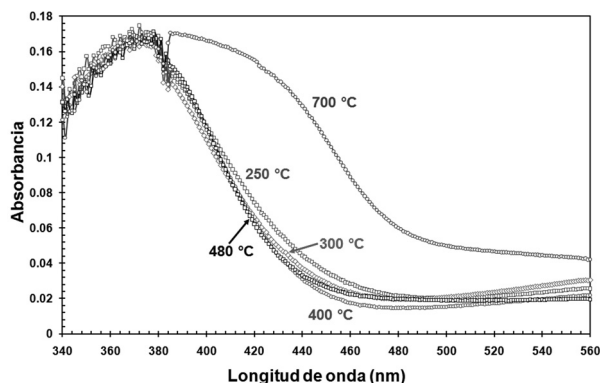


Fig. 4. Espectroscopía de reflectancia difusa del óxido $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ preparado mediante coprecipitación a diferentes temperaturas de calcinación.

entran dentro de los valores típicos reportados para óxidos de metales de transición sintetizados por coprecipitación, los cuales son aproximadamente de un orden de magnitud mayor a los obtenidos con respecto al método de síntesis empleado como referencia.

La actividad fotocatalítica del $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ fue evaluada mediante la degradación del colorante orgánico rodamina B. A partir de los resultados obtenidos se calcularon las constantes cinéticas mediante el modelo de Langmuir-Hinshelwood para una reacción de primer orden. Se observó un notable descenso en el tiempo de vida media del colorante, desde 1386 minutos cuando se emplea el fotocatalizador sintetizado por estado sólido, hasta sólo 29.4 minutos para el caso donde se utilizó como fotocatalizador al molibdato sintetizado por coprecipitación. Es evidente que la actividad fotocatalítica del material de coprecipitación fue aproximadamente 47 veces mayor con respecto al material obtenido por el método cerámico tradicional. Dicha diferencia puede ser explicada de acuerdo a la síntesis del óxido: mientras el método cerámico tradicional proporciona un material altamente sinterizado y una baja área superficial, la técnica de coprecipitación provee un material con una mayor área superficial.

Por otro lado, las muestras de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ obtenidas por coprecipitación presentaron una fuerte interacción con el colorante orgánico, lo que condujo a que un porcentaje importante de moléculas del colorante fueran adsorbidas en la superficie del fotocatalizador. Ante esta situación, fue necesario dar

un tratamiento experimental diferente con el fin de caracterizar debidamente la actividad fotocatalítica de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$. De acuerdo a esto, se realizaron experimentos a diferentes concentraciones iniciales del colorante en presencia del semiconductor, bajo condiciones de oscuridad, con el objetivo de evaluar el grado de adsorción en cada muestra calcinada, previo al estudio de su actividad fotocatalítica. Asimismo, se evaluó el efecto del pH en la adsorción de rodamina B a una concentración inicial de $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ sobre la superficie de las muestras de la fase $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, donde la mayor interacción fotocatalizador-colorante se presentó a valores de $\text{pH} \sim 6.5$, tal como se observa en la figura 5.

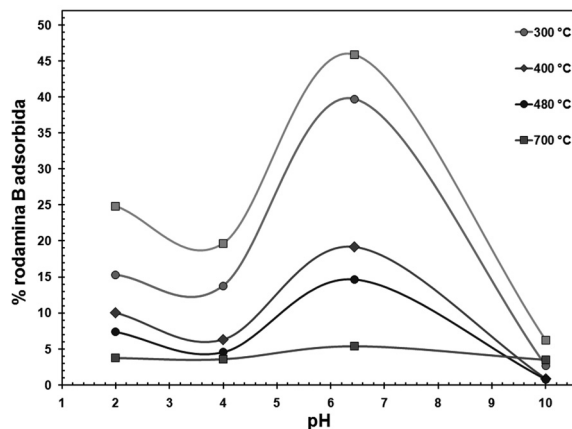


Fig. 5. Variación en la adsorción de rodamina B sobre $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ en función del pH.

La evolución de la concentración del colorante en presencia de la fase $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ bajo luz visible es observado en la figura 6. Como se puede observar en la figura, el proceso puede ser dividido en tres etapas distintas: (a) dispersión mediante ultrasonido del fotocatalizador en la solución del colorante, bajo condiciones de oscuridad; (b) establecimiento del equilibrio de adsorción-desorción en oscuridad y (c) degradación del colorante bajo luz visible. El equilibrio adsorción-desorción fue alcanzado durante los primeros quince minutos de contacto entre el fotocatalizador y la solución de rodamina B bajo oscuridad.

En general, todas las muestras fueron capaces de degradar rhB, sin embargo, esto ocurrió a diferentes velocidades. La muestra calcinada a 250°C presentó el efecto más marcado, necesitando sólo 80 minutos de irradiación de luz visible para la completa desaparición del colorante, en comparación con aproximadamente

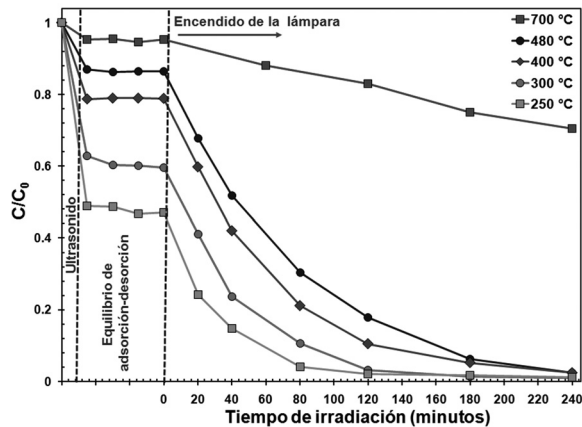


Fig. 6. Fotodegradación de rodamina B en presencia de $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ obtenido por coprecipitación.

240 minutos que necesitó la muestra calcinada a 480°C para llegar al mismo punto.

Con el fin de determinar el grado de mineralización de rhB por acción de los molibdatos propuestos, se realizaron experimentos para determinar el grado de carbón orgánico total (TOC) de muestras con distintos tiempos de irradiación de luz visible. Especial énfasis se puso en el uso de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ como fotocatalizador ya que éste presentó una mejor actividad fotocatalítica que $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, además de no presentar un fenómeno de adsorción de colorante considerable como para dificultar la interpretación de resultados. De acuerdo a los resultados obtenidos, el grado de mineralización del colorante fue alrededor de 86% a 100 horas de irradiación de luz visible. Estos valores nos dan la certeza que ocurre la mineralización de rodamina B utilizando el semiconductor $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$.

Para la deposición de película delgada se eligió al fotocatalizador $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ dada su mayor actividad fotocatalítica con respecto $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$. El depósito del molibdato $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ se realizó colocando rejillas de cobre y placas de vidrio dentro del sistema de evaporación térmica. En particular, la recolección de partículas sobre una rejilla de cobre tuvo el propósito de conocer su naturaleza y morfología mediante microscopía electrónica de transmisión y barrido. La figura 7 muestra una micrografía por TEM de las partículas depositadas sobre una rejilla de Cu con película de Fomvar.

En la imagen se pueden observar partículas redondas de entre 12 y 17 nm de diámetro así como

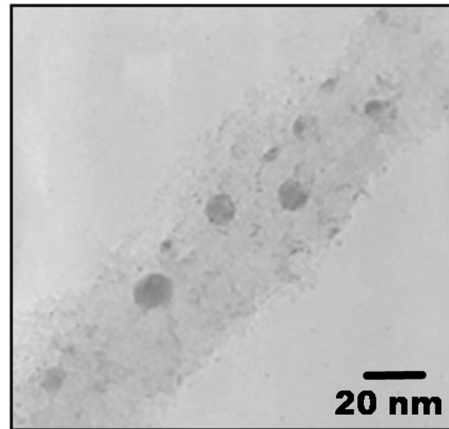


Fig. 7. Imagen tomada por TEM de partículas depositadas sobre rejilla de Cu.

la presencia de nanopartículas con un diámetro alrededor de 3 nm. Al realizar una difracción de electrones en toda la imagen, se obtiene un patrón de difracción en forma de anillos, véase la figura 8(a). Una difracción de esta forma indica que existen cristales (en este caso nanopartículas) que son mucho más pequeñas que el diámetro del haz con el que se realiza la difracción. Además, estos anillos pudieron ser indexados con los planos (110) y (211) de la estructura bcc del Mo.

Cuando el diámetro del haz fue reducido a 5 nm para alcanzar condiciones de nanodifracción, un patrón de spots, como el que se muestra en la figura 8(b) fue obtenido. Esta prueba de nanodifracción fue dirigida sobre la partícula que se encuentra en el centro de la imagen con la finalidad de obtener su estructura cristalina, pero como se puede apreciar, durante la prueba posiblemente se alcanza el dominio de otro cristal ya que se aprecia una difracción con una segunda orientación. La indexación de estos spots

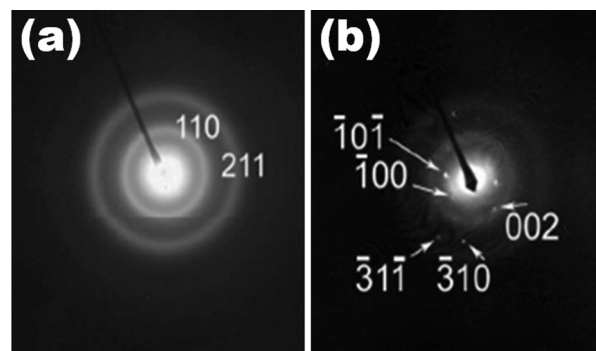
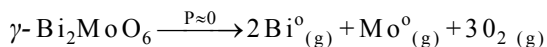


Fig. 8. Difracción de electrones de partículas depositadas sobre rejilla de Cu.

correspondió a los planos de la estructura hexagonal del Bi. De acuerdo a lo anterior, el análisis por TEM indica que la evaporación de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ dentro de la cámara es acompañada por una descomposición en sus correspondientes elementos metálicos, tal como puede ser descrito por la siguiente ecuación:



Transcurrido este proceso, las nanopartículas de ambos elementos se depositan en el sustrato en su forma metálica. De acuerdo a la difracción de electrones, las nanopartículas de mayor dimensión corresponden al Bi, mientras que las de Mo son más pequeñas con apariencia de puntos discretos. La figura 9(b) muestra la apariencia física de la película depositada en el sustrato de vidrio.

La película mostró una coloración negra de aspecto metálico, lo que está en concordancia con los resultados obtenidos por TEM que indican la presencia de un depósito metálico. La película fue tratada térmicamente a 550°C por 4 h en aire con el propósito de formar el molibdato $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ por captura de oxígeno atmosférico. El resultado de este proceso fue un remarcado cambio en la coloración de la película, de negro a amarillo pálido, véase la figura 9(c).

El color desarrollado por la película es similar al color característico de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ en forma policristalina. Para fines comparativos, se incluye en la figura 9(a) la apariencia física del sustrato de vidrio sin depósito de material. La formación de

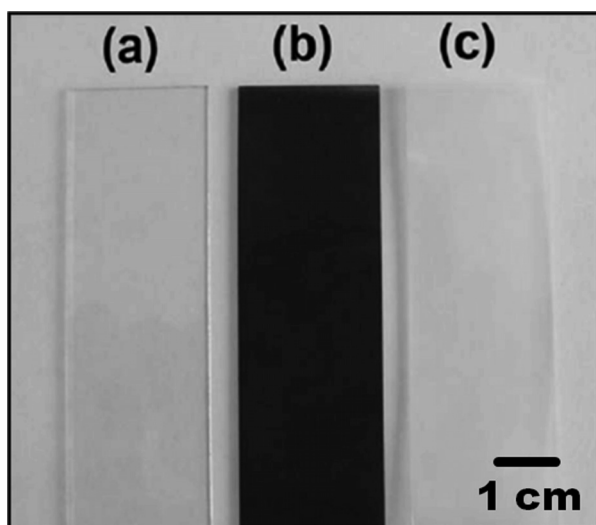


Fig. 9. Sustrato de vidrio utilizado para el depósito de película mediante evaporación térmica de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$.

$\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ por tratamiento térmico fue confirmada por difracción de rayos-X.

La actividad fotocatalítica de la película delgada de $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ fue evaluada mediante la degradación de una película de rhB depositada sobre la superficie del fotocatalizador. Para este fin, se depositó rhB en forma de película sobre la superficie del fotocatalizador. La figura 10 muestra la evolución temporal de la coloración de la película de rhB depositada sobre la película de fotocatalizador cuando ésta fue expuesta a la fuente de radiación visible.

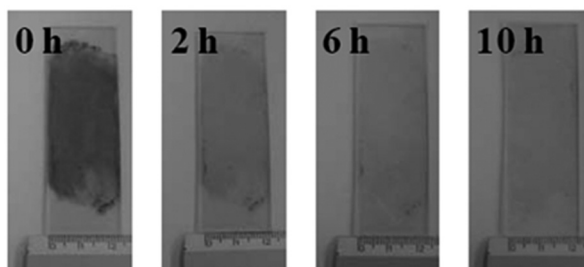


Fig. 10. Evolución temporal de la coloración de una película de rhB bajo irradiación de luz visible sobre la superficie del fotocatalizador.

Como puede observarse en la figura anterior, el color de la rhB experimenta un importante descenso en su intensidad en 2h de exposición a la radiación visible y prácticamente se alcanza una decoloración total luego de 6h. Un experimento similar fue realizado en ausencia de la película del fotocatalizador a manera de referencia. La figura 11 muestra para este caso un blanqueamiento lento de la película de rhB debido a un proceso de fotólisis del colorante. No obstante, el color rosa característico de la rhB permaneció aún después de 32h de exposición a la radiación visible. Lo anterior indica que es necesaria la combinación fotocatalizador/radiación visible para eliminar al colorante orgánico.

Este hecho es de notable relevancia desde un punto de vista práctico. El hecho de tener un sistema para purificar agua basado en el uso de una película de fotocatalizador permitirá eliminar el costoso proceso de remoción del mismo una vez transcurrido el proceso de eliminación de contaminantes. Puesto que, en parte, la actividad fotocatalítica del óxido está en función de su tamaño de partícula, su separación del medio acuoso representa un reto mayor. Más aún, el hecho de obtener un fotocatalizador en forma

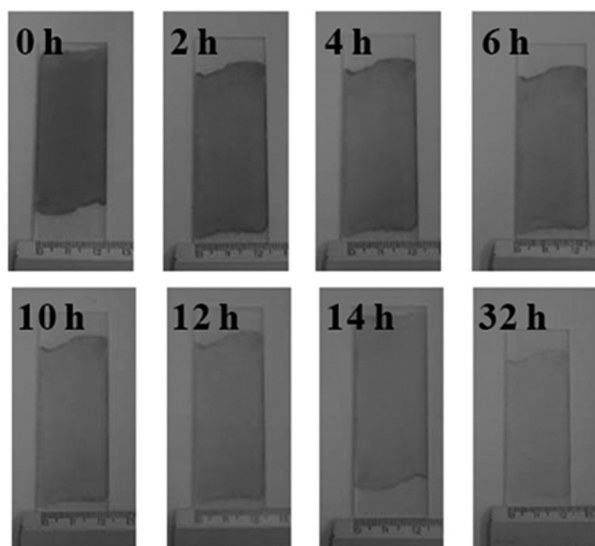


Fig. 11. Evolución temporal de la coloración de una película de rhB bajo irradiación de luz visible sobre un sustrato de vidrio.

de película permite su aplicación no sólo en medio acuoso, sino también para sistemas de purificación de aire para la eliminación de NO_x y compuestos orgánicos volátiles.

CONCLUSIONES

El presente trabajo comprende un exhaustivo estudio sobre la actividad fotocatalítica de molibdatos de bismuto para la eliminación de contaminantes orgánicos en medio acuoso por acción de irradiación con luz visible. Esto es, desde una exploración del diagrama de fases $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$ para la elección de las fases a probar en función de sus propiedades físicas, la detección de actividad fotocatalítica en los mismos, pasando por una potenciación de dicha actividad por la preparación de los óxidos por rutas alternas de síntesis; hasta la aplicación del mejor fotocatalizador en forma de película delgada con miras a una aplicación tecnológica a mediano plazo. Todo esto teniendo como objetivo el contribuir al desarrollo del conocimiento científico del área y de igual manera dar un paso hacia la aplicación tecnológica de películas delgadas fotocatalíticamente activas.

Para la formación de las películas delgadas, se eligió al fotocatalizador $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ dada su mayor actividad fotocatalítica con respecto al otro molibdato

estudiado, el óxido $\alpha\text{-Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$. Los resultados mostraron una retención de la actividad fotocatalítica del $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ cuando éste fue depositado en forma de película en un sustrato de vidrio. Por otro lado, dado que la actividad de un fotocatalizador está en función de su tamaño de partícula, su separación del medio acuoso representa un reto mayor, es por ello que el hecho de obtener un fotocatalizador en forma de película permite su fácil recuperación lo que facilita su aplicación no sólo en medio acuoso, sino también para sistemas de purificación de aire para la eliminación de NO_x y compuestos orgánicos volátiles.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CONACYT por su apoyo a este trabajo de investigación a través del proyecto 81546 y a la UANL por el apoyo del proyecto PAICYT 2008.

REFERENCIAS

1. D.S. Kim, Y. S. Park, Photocatalytic decolorization of rhodamine B by immobilized TiO_2 onto silicone sealant, *Chemical Engineering Journal* 116 (2006) 133-137.
2. A. Martínez-de la Cruz, S. Obregón Alfaro, Synthesis and characterization of $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ prepared by co-precipitation: photoassisted degradation of organic dyes under Vis-irradiation, *J. Mol. Catal. A: Chem.* 320 (2010) 85-91.
3. J.C. Jung, H. Kim, A.S. Choi, Y.M. Chung, T.J. Kim, S.J. Lee, S.H. Oh, I.K. Song, Effect of pH in the preparation of $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ for oxidative dehydrogenation of n-butene to 1,3-butadiene: Correlation between catalytic performance and oxygen mobility of $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$, *Catalysis Communications* 8 (2007) 625-628.
4. E. López Cuéllar, A. Martínez-de la Cruz, K.H. Lozano Rodríguez, U. Ortiz Méndez, Preparation of $\gamma\text{-Bi}_2\text{MoO}_6$ thin films by thermal evaporation deposition and characterization for photocatalytic applications, *Catalysis Today* (2010), doi:10.1016/j.cattod.2010.05.005.
5. B. Ohtani. Preparing Articles on Photocatalysis- Beyond the Illusions, Misconceptions, and Speculation, *Catalysis Letters* 37 (2008) 217-229.