



Impacto del Óxido de Zinc (ZnO) y Dióxido de Titanio (TiO₂) como fotocatalizadores en la degradación oxidativa del índigo, en efluentes generados por la Industria Textilera

Impact of Zinc Oxide (ZnO) and Titanium Dioxide (TiO₂) as photocatalysts in the oxidative degradation of indigo, in effluents generated by the Textile Industry

Impacto do Óxido de Zinco (ZnO) e Dióxido de Titânio (TiO₂) como fotocatalisadores na degradação oxidativa do índigo, em efluentes gerados pela Indústria Têxtil

Hugo Javier Sánchez-Moreno ^I
hugoj.sanchez@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0074-3237>

Hugo Segundo-Calderón ^{II}
hcalderon@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9213-9717>

Karina Gabriela-Salazar ^{III}
gabriela.salazar@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-9527-3289>

María Augusta Guadalupe-Alcoser ^{IV}
ma.guadalupe@uea.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0547-215X>

Correspondencia: hugoj.sanchez@esPOCH.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Recibido:** 02 de enero de 2022 ***Aceptado:** 22 de enero de 2022 * **Publicado:** 16 de febrero de 2022

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), sede Morona Santiago, Ecuador.
- IV. Universidad Estatal Amazónica, Ecuador.

Resumen

En la presente investigación se realizó una comparación selectiva entre el óxido de zinc (ZnO) de carácter metálico y el dióxido de titanio (TiO₂) de carácter no metálico como fotocatalizadores, para analizar la influencia que tiene la degradación oxidativa del colorante índigo al tratar efluentes de la industria textilera. El trabajo preliminar inició con la elaboración de una curva de calibración característica para la solución de índigo, la misma que se elaboró con un espectrofotómetro UV-visible HITACHI U-1900 y una celda de Cuarzo, que emite una longitud de onda de 665 nm. Posteriormente se realizaron cuatro pruebas a diferentes condiciones, en donde los parámetros investigados fueron: en presencia de luz solar sin agitación, en presencia de luz solar con agitación, en deserción de luz solar sin agitación y en deserción de luz solar con agitación.

La experimentación inició con la preparación de ocho soluciones de índigo a una concentración estable de (0,0537 M). Seguidamente se tomó cuatro muestras y se adicionó óxido de zinc y a las cuatro muestras faltantes se adicionó dióxido de titanio, aplicando cuatro dosificaciones diferentes, obteniendo concentraciones de 1,67 g/L, 3,33 g/L, 5,00 g/L y 6,67 g/L de cada catalizador. Posteriormente se tomaron varias alícuotas de la mezcla, en intervalos de 10 minutos para las pruebas sin agitación y de 15 minutos para las pruebas con agitación, las cuales se llevó al espectrofotómetro, para su respectiva medición y se anotaron los valores de absorbancia. El tiempo total del análisis fue de 1 hora. Procedimientos semejantes se aplicaron a cada muestra para las condiciones previamente descritas.

Al final del experimento, se encontró que para el óxido de zinc sus condiciones óptimas se alcanzan con concentraciones de 3,33 g/L en presencia solar y agitación, mientras que para el óxido de titanio corresponden a 3.33 g/L en presencia solar y reposo.

Palabras claves: Índigo; Fotocatálisis; Fotocatalizador; Tratamiento de Aguas Residuales; Industria Textil

Abstract

In the present investigation, a selective comparison was made between metallic zinc oxide (ZnO) and non-metallic titanium dioxide (TiO₂) as photocatalysts, to analyze the influence of oxidative degradation of indigo dye when treating effluents of the textile industry. The preliminary study began with the elaboration of a characteristic calibration curve for the indigo solution, the same that was elaborated with a HITACHI U-1900 UV-visible spectrophotometer and a Quartz cell,

which emits a wavelength of 665 m. Subsequently, four tests were obtained under different conditions, where the parameters investigated were: in the presence of sunlight without emotion, in the presence of sunlight with emotion, in dropout of sunlight without emotion and in dropout of sunlight with emotion.

The experimentation began with the preparation of eight solutions of indigo at a stable concentration of (0.0537 M). Then four samples were taken and zinc oxide was added and titanium dioxide was added to the four missing samples, applying four different dosages, obtaining concentrations of 1.67 g/L, 3.33 g/L, 5.00 g/L and 6.67 g/L of each catalyst. Subsequently, several aliquots of the mixture were taken at intervals of 10 minutes for the tests without clearance and 15 minutes for the tests with clearance, which were taken to the spectrophotometer for their respective measurement and the absorbance values were recorded. Total analysis time was 1 hour. Similar procedures apply to each sample for the conditions previously described.

At the end of the experiment, it was found that for zinc oxide its optimal conditions are reached with concentrations of 3.33 in the presence of sunlight and neutralization, while for titanium oxide it corresponds to 3.33 in the presence of sunlight and rest.

Keywords: Indigo; Photocatalysis; Photocatalyst; Wastewater Treatment; Textile Industry

Resumo

Na presente investigação, foi feita uma comparação seletiva entre óxido de zinco metálico (ZnO) e dióxido de titânio não metálico (TiO₂) como fotocatalisadores, para analisar a influência da degradação oxidativa do corante índigo no tratamento de efluentes da indústria têxtil. O trabalho preliminar começou com a elaboração de uma curva de calibração característica para a solução de índigo, a mesma que foi elaborada com um espectrofotômetro UV-visível HITACHI U-1900 e uma célula de quartzo, que emite um comprimento de onda de 665 nm. Posteriormente, foram realizados quatro testes em diferentes condições, onde os parâmetros investigados foram: na presença de luz solar sem agitação, na presença de luz solar com agitação, na deserção da luz solar sem agitação e na deserção da luz solar com agitação.

A experimentação começou com a preparação de oito soluções de índigo a uma concentração estável de (0,0537 M). Em seguida, foram retiradas quatro amostras e adicionado óxido de zinco e dióxido de titânio foi adicionado às quatro amostras faltantes, aplicando quatro dosagens diferentes, obtendo concentrações de 1,67 g/L, 3,33 g/L, 5,00 g/L e 6,67 g/L de cada catalisador.

Posteriormente, foram retiradas várias alíquotas da mistura, em intervalos de 10 minutos para os testes sem agitação e 15 minutos para os testes com agitação, que foram levadas ao espectrofotômetro para sua respectiva medição e os valores de absorbância foram registrados. O tempo total de análise foi de 1 hora. Procedimentos semelhantes foram aplicados a cada amostra para as condições descritas anteriormente.

Ao final do experimento, verificou-se que para o óxido de zinco suas condições ótimas são alcançadas com concentrações de 3,33 g/L na presença de luz solar e agitação, enquanto para o óxido de titânio correspondem a 3,33 g/L na presença de luz solar e repouso.

Palavras-chave: Índigo; Fotocatálise; Fotocatalisador; Tratamento de águas residuais; Indústria textil

Introducción

En el Ecuador, los efluentes procedentes de industrias textiles constituyen un problema de difícil manejo en términos medioambientales. Estas industrias a pesar de contar con un gran potencial económico, carecen de las tecnologías necesarias para realizar un tratamiento de sus aguas residuales que pueda considerarse eficiente. Procedimientos tales como la electrocoagulación, filtración, osmosis inversa y flotación presentan resultados aceptables, no obstante son poco utilizados debido a que demandan una gran inversión económica.

Una alternativa viable en términos económicos, es la fotocatalisis, técnica que basa funcionamiento en la utilización de recursos ilimitados como la luz solar y oxígeno en conjunto con catalizadores de bajo costo. Por esta razón, se propone la utilización de esta técnica en la industria nacional. Para esto se realiza una investigación acerca de efectividad de este proceso mediante el uso de diferentes catalizadores (Garcia & Souza, 2016).

La presente investigación se enfoca en la degradación fotocatalítica del colorante índigo, compuesto mayoritario en las mezclas tinturantes de telas jean. El índigo, a pesar de ser un colorante natural, en el Ecuador es importado como un producto sintético. En cuanto a su estructura presenta anillos aromáticos heterocíclicos unidos mediante un enlace doble carbono- carbono, el mismo que es un grupo cromóforo responsable de su coloración azul característica (Quintero, 2010).

La complejidad en la estructura del índigo lo convierte en un compuesto de difícil degradación, razón por la cual es catalogado como un potencial contaminante de aguas. Para hacer frente a esta

problemática, se aplica la fotocatálisis, en la cual el catalizador en compañía del oxígeno presente en aguas residuales, es activado mediante la luz solar, generando radicales OH[·]. Estos radicales atacan al grupo cromóforo característico del índigo, degradándolo. De esta manera se logra reducir el carácter contaminante de las aguas residuales (Zaruma, Proal, & Hernández, 2018).

Para ampliar el espectro de resultados se propone una comparación entre dos de los catalizadores más accesibles en el mercado ecuatoriano como es el óxido de cinc (ZnO) y el dióxido de titanio (TiO₂). Esta comparación se realiza mediante un análisis cinético del proceso de degradación del índigo a diferentes condiciones las cuales incluyen la cantidad de radiación solar presente, y la presencia o no de agitación mecánica (Lebeau et al., 2020).

Metodología

Para la determinación de la oxidación del colorante Índigo se emplearon 2 fotocatalizadores, óxido de Zinc de pureza (89-93 %) y óxido de Titanio de grado técnico (90% en pureza). Se utilizaron de igual forma agua destilada para las respectivas diluciones. La elaboración de la curva de calibración del colorante Índigo se realizó con la ayuda de un espectrofotómetro UV-visible HITACHI U-1900 y una celda de cuarzo, para ello se empleó 5 matraces de 5 mL que contenían las soluciones de Índigo.

La dosificación de los catalizadores se llevó a cabo en una balanza analítica Citizen Scale USA CX 220 de apreciación 0,0001g, se emplearon también dos lunas de vidrio reloj, 2 espátulas. En la elaboración de la solución madre de colorante Índigo se necesitó un matraz afora de 1000 mL y una probeta de 1000 mL. Seguidamente se realizó la preparación de las diferentes concentraciones del colorante Índigo, para el cual se utilizaron 8 matraces de 250 mL, 2 pipetas graduadas de 10mL, 2 probetas de 50 mL, una propipeta.

En la medición cuantitativa de la concentración del colorante Índigo en el proceso de oxidación se empleó el espectrofotómetro UV-visible HITACHI U-1900 ocho celdas de plástico, un cronometro con el cual se tomó los tiempos, la separación del catalizador con la solución se realizó empleando papel filtro y dos embudos de vidrio. Para la toma de las muestras de cada alícuota se utilizaron dos jeringuillas de 5 mL y para la realización de las pruebas de agitación se utilizó el agitador de matraces New Brunswick NS USA (Manjarres, 2019).

Métodos

Elaboración de la curva de Calibración.

Para la elaboración de la curva de calibración del colorante Índigo se realizó un previo barrido con una solución del colorante Índigo de 0,0005 M, posteriormente se realizó 6 diluciones de esta misma concentración base expresadas en la Tabla N°1 con lo cual se obtiene las respectivas absorbancias.

Tabla 1. Datos para la curva de Calibración del Índigo a 665nm.

Concentration [M]	Absorbancia
0.0005	-0.001
0.0052	0.075
0.01	0.120
0.05	0.560
0.096	1.182

La Figura N° 1 muestra la curva de calibración a 665 nm, obtenida al realizar una relación entre la absorbancia y la concentración del índigo, para un $R^2 = 0,9974$.

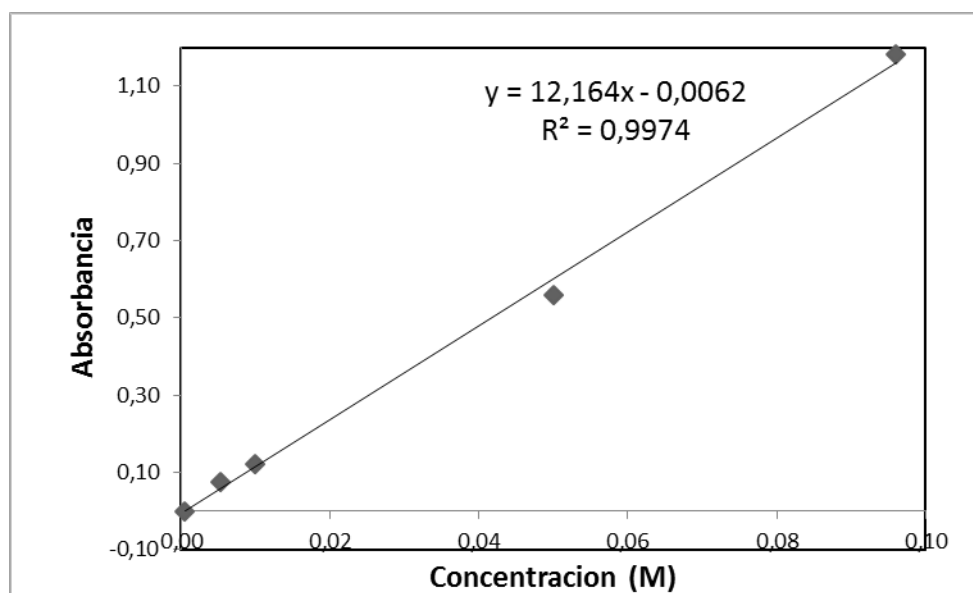


Figura 1. Curva de Calibración para el Índigo a 665nm, obtenida por espectrofotometría.

Medición de la oxidación del colorante índigo sin agitación, con y sin exposición solar.

Para la medición de la oxidación del colorante índigo se realizaron 8 soluciones de índigo con concentración 0,0537 M, se colocó 25 mL de solución en 8 vasos de precipitación de 50 mL, se colocaron a los 4 primeros vasos de precipitación 0,05 g; 0,1 g; 0,15 g y 0,2 g de óxido de Zinc, a los 4 vasos restantes se colocó la misma cantidad establecida pero de óxido de Titanio.

Una vez preparadas las soluciones se tomó el tiempo de cada una de ellas mediante un cronometro y se tomó alícuotas cada 10 minutos de las muestras las cuales fueron obtenidas con la ayuda de la jeringa y filtradas a través de papel filtro para colocar en una celda de plástico para su respectiva medición en el espectrofotómetro, este procedimiento se realizó bajo luz solar y se repitió el mismo pero sin la presencia de la luz solar (Barka et al, 2007).

Medición de la oxidación del colorante índigo con agitación, con y sin exposición solar.

Para la medición de la oxidación del colorante índigo se realizó de igual forma una solución de índigo de 0,0537 M y se tomó 30 mL de esta solución y se colocó en 8 matraces de 250 mL los cuales estaban ubicados en el agitador de matraces, la dosificación del catalizador tanto de óxido de Zinc como de óxido de Titanio fue la ya mencionada en el procedimiento anterior (Atkins, 1986).

Se procedió a tomar el tiempo y se prendió el equipo dándole un nivel de agitación de 4, cada 15 minutos se tomó alícuotas con la ayuda de las jeringas y después de pasar estas alícuotas a través de papel filtro se colocaron en las celdas de plásticos y se llevó al espectrofotómetro, este experimento se realizó con agitación mecánica y sin la presencia de luz solar.

La medición de las soluciones bajo la influencia de luz solar y la agitación se la realizó bajo las mismas condiciones de concentración inicial de índigo, número de matraces e igual dosificación de catalizador, pero en esta ocasión la agitación fue de forma manual y las mediciones de las alícuotas fueron cada 15 minutos.

Elaboración de la cinética del proceso tanto para óxido de Zinc como para óxido de Titanio.

Para la elaboración de la cinética del proceso se tomaron los datos de la Tabla 5, posteriormente se aplicó el método diferencial para ver la mejor ecuación a la cual se ajustan los datos y así determinar el orden de la cinética del proceso, este procedimiento se realizó para ambos fotocatalizadores

(ZnO y TiO₂), obteniendo así las ecuaciones características de la cinética del proceso de oxidación del colorante Índigo y su respectiva constante (Gil & Molina, 2006).

Resultados y Discusión

Prueba con agitación y sin exposición solar

En la Tabla N° 2 se indica las concentraciones obtenidas mediante el proceso de fotodegradación del Índigo con ZnO y TiO₂, a condiciones de reposo y sin exposición solar.

Tabla 2. Concentraciones obtenidas en la fotodegradación del Índigo con ZnO y TiO₂, para la prueba en reposo y sin exposición solar.

t(min)	1,67 g/L Catalizador		3,33 g/L Catalizador		5,00 g/L Catalizador		6,67 g/L Catalizador	
	Concentración Índigo (M)							
	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂
0	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537
10	0,0493	0,0114	0,0504	0,0161	0,0509	0,0146	0,0534	0,0141
20	0,0499	0,0088	0,0514	0,0129	0,0473	0,0139	0,0519	0,0129
30	0,0488	0,0073	0,0505	0,0117	0,0466	0,0082	0,0472	0,0084
40	0,0501	0,0077	0,0475	0,0092	0,0418	0,0076	0,0467	0,0121
50	0,0498	0,0141	0,0450	0,0181	0,0371	0,0135	0,0457	0,0161
60	0,0455	0,0215	0,0416	0,0252	0,0347	0,0138		

Centrándose en el caso específico de privación solar con agitación, se puede observar en las figuras 2, 3, 4 y 5, que evidentemente la concentración de índigo disminuye con el transcurso del tiempo, conducta ciertamente esperada que refleja la acción del catalizador. Esta tendencia resulta similar para el uso del ZnO o TiO₂. No obstante se puede visualizar que la pendiente más pronunciada, es decir, la mayor cinética de degradación se alcanza con el TiO₂.

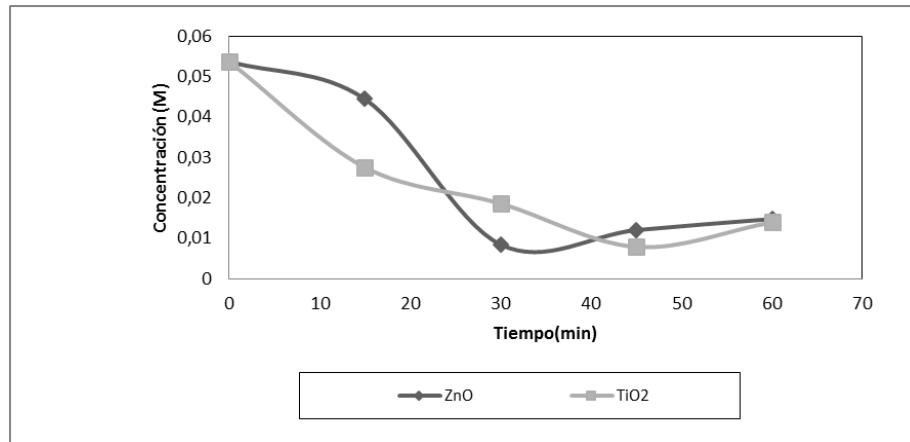


Figura 2. Fotodegradación del Índigo con 0,05 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

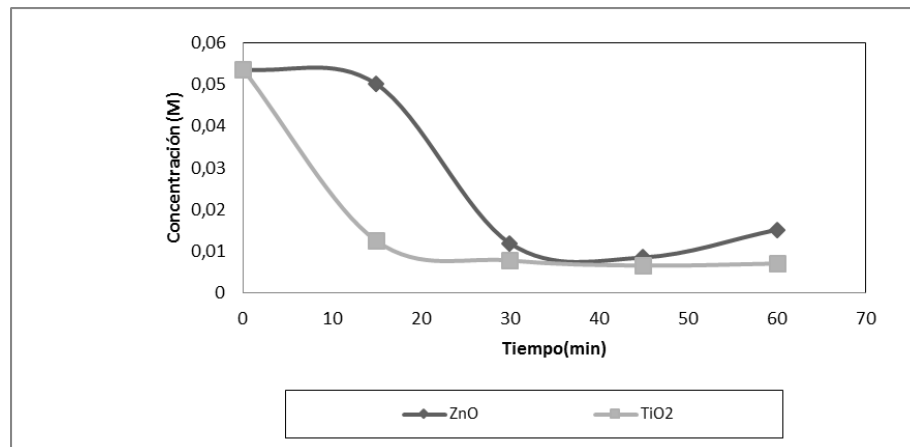


Figura 3. Fotodegradación del Índigo con 0,10 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

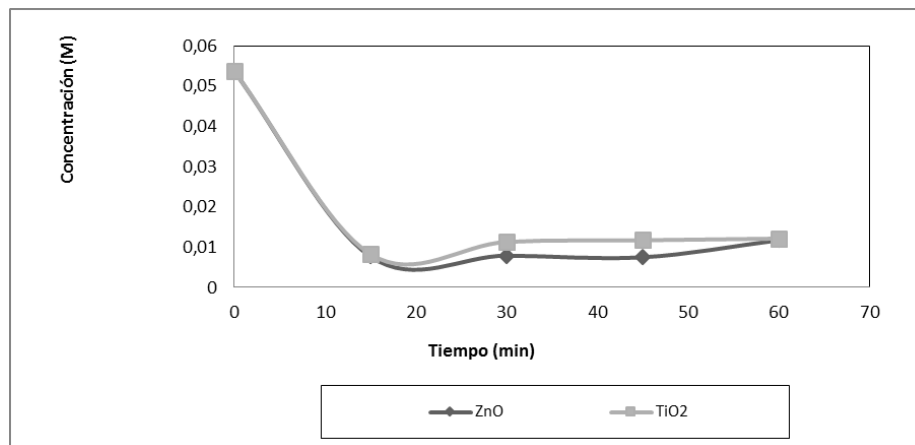


Figura 4. Fotodegradación del Índigo con 0,15 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

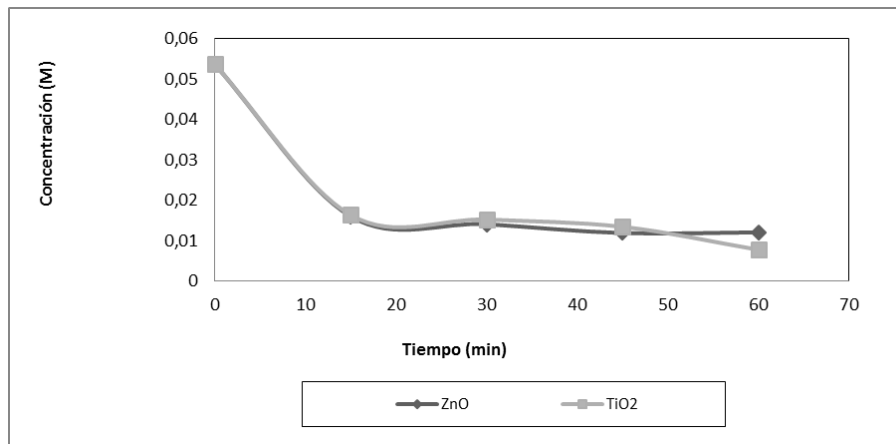


Figura 5. Fotodegradación del Índigo con 0,20 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

A pesar de la tendencia obvia que presentan las figuras antes mencionadas, se visualiza que en la mayoría de ellas, el último punto de la curva presenta un incremento en la concentración de índigo. Este desacierto en los datos puede justificarse debido a un error de experimentación, específicamente de filtración. Esto ocurrió debido al uso continuo del filtro en la diferente toma de alícuotas, lo que conlleva a la saturación del mismo. Resultado de esto, la alícuota trasladada al espectrofotómetro presentó una cierta cantidad de sólidos disueltos, mismos que provocan una elevación en la absorbancia, lo que se traduce a una elevación de la concentración.

En cuanto a la concentración óptima de catalizador, se puede observar en las figuras 3,4 y 5, que para el ZnO ó TiO₂, la mayor cinética se presenta con una concentración de 3,33 g catalizador/L. Es necesario esclarecer que a mayores concentraciones de catalizador la cinética no mejora, por lo cual añadir más catalizador resultará innecesario. Con esto se sospechó que el catalizador tiene un comportamiento asintótico (Lucioni, & Baudrit, 2012).

Prueba en reposo y sin exposición solar

En la Tabla N° 3 se indica las concentraciones obtenidas mediante el proceso de fotodegradación del Índigo con ZnO y TiO₂, a condiciones de reposo y con exposición solar.

Tabla 3. Concentraciones obtenidas en la fotodegradación del Índigo con ZnO y TiO₂, para la prueba en reposo y exposición solar.

	1,67 g/L Catalizador		3,33 g/L Catalizador		5,00 g/L Catalizador		6,67 g/L Catalizador	
	Concentración Índigo (M)							
t(min)	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂
0	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537
10	0,0518	0,0516	0,0509	0,0516	0,0552	0,0544	0,0532	0,0103
25	0,0513	0,0132	0,0503	0,0270	0,0502	0,0108	0,0522	0,0086
45	0,0518	0,0092	0,0500	0,0239	0,0421	0,0076	0,0531	0,0065
60	0,0512	0,0107	0,0497	0,0112	0,0404	0,0064	0,0524	0,0059
75	0,0509	0,0123	0,0519	0,0064	0,0379	0,0077	0,0564	0,0069
100	0,0526	0,0152	0,0533	0,0062	0,0438	0,0071		

Centrándose específicamente en el caso de privación solar sin agitación se puede observar en las figuras 6, 7, 8 y 9, que para el caso de TiO₂, se presenta una disminución de la concentración del índigo. No obstante su cinética resulta ser ligeramente inferior frente a la del caso anterior (con agitación), resultado ciertamente esperado debido a que la agitación favorece la presencia de oxígeno, lo que se traduce en una mayor formación de radicales OH⁻, responsables de una mayor degradación de índigo (Hidalgo & Hernández, 2014).

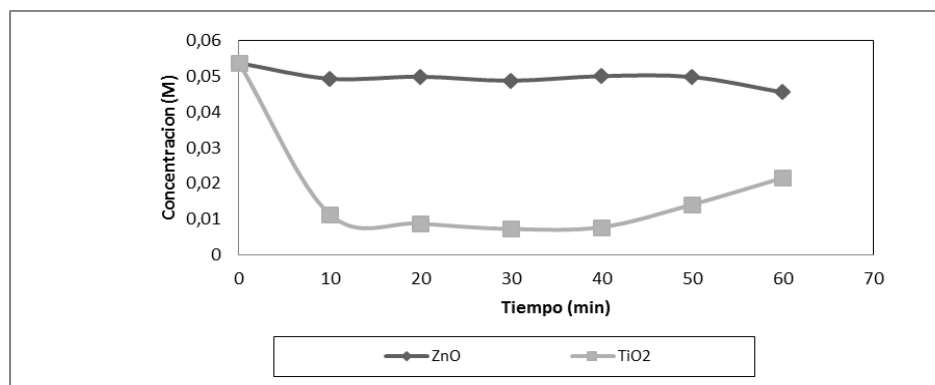


Figura 6. Fotodegradación del Índigo con 0,05 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

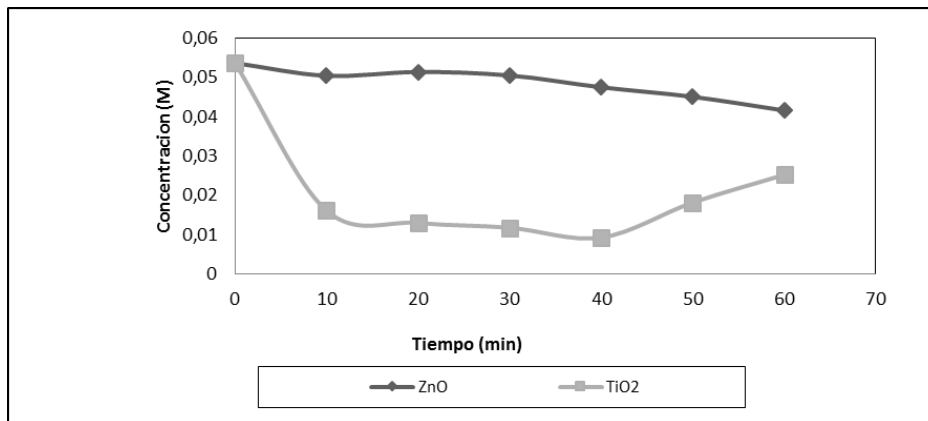


Figura 7. Fotodegradación del Índigo con 0,10 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

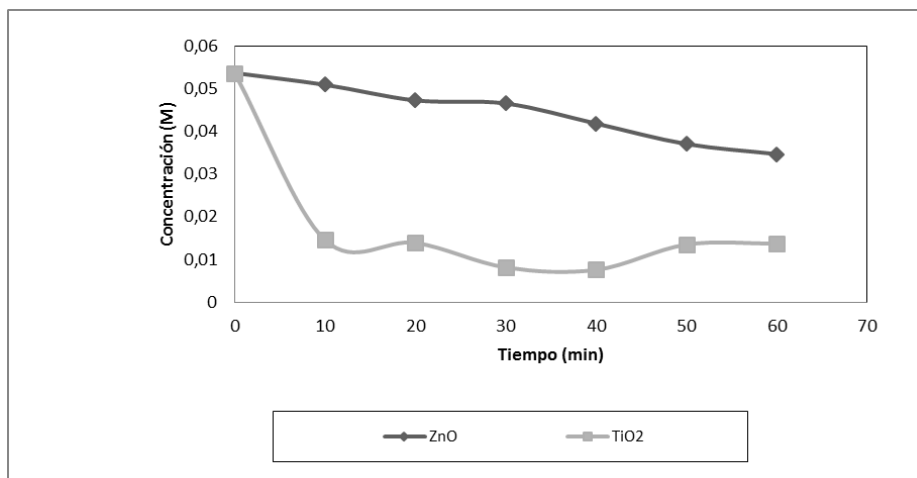


Figura 8. Fotodegradación del Índigo con 0,15 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

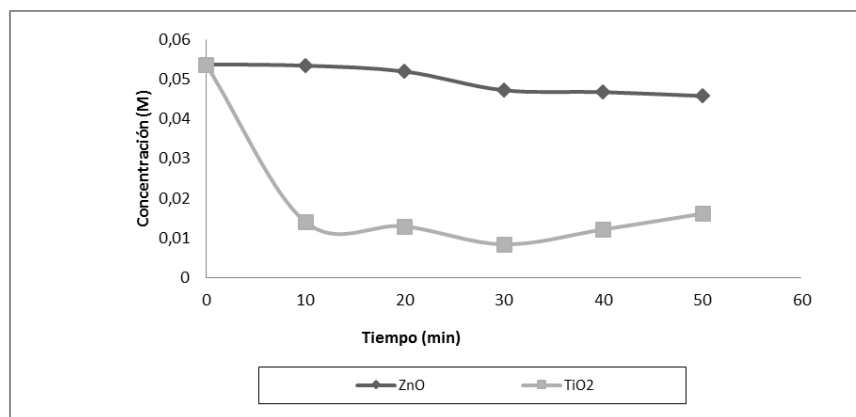


Figura 9. Fotodegradación del Índigo con 0,20 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que para el caso anterior (con agitación) se puede observar que los últimos puntos de estas curvas asimismo presentan una elevación en su concentración, anomalía explicada anteriormente. En cuanto al ZnO, se puede observar en las figuras 6, 7, 8 y 9, que poseía una baja foto-degradación del índigo, lo que nos indicó una poca funcionalidad como catalizador. Por lo cual se puede inferir que el óxido de zinc requiere de agitación para poner en marcha su acción catalítica (Pubiano y Laguna ,2004).

Referente a la concentración óptima de catalizador que; como se lo puede observar en las figuras 7, 8 y 9; resulta ser TiO₂, a partir de una concentración del mismo de 3.33 g/L se obtienen los mejores resultados. Finalmente igual que para el caso anterior a mayores concentraciones de catalizador la cinética aumenta, comportamiento explicado anteriormente.

Prueba con agitación y exposición solar

En la Tabla N° 4 se indica las concentraciones obtenidas mediante el proceso de fotodegradación del Índigo con ZnO y TiO₂, a condiciones de reposo y con exposición solar.

Tabla 4. Concentraciones obtenidas en la fotodegradación del Índigo con ZnO y TiO₂, para la prueba con agitación y sin exposición solar.

	1,67 g/L Catalizador		3,33 g/L Catalizador		5,00 g/L Catalizador		6,67 g/L Catalizador	
	Concentración Índigo (M)							
t(min)	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂	ZnO	TiO ₂
0	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537
15	0,0444	0,0276	0,0501	0,0125	0,0077	0,0083	0,0160	0,0164
30	0,0085	0,0186	0,0120	0,0078	0,0079	0,0113	0,0141	0,0152
45	0,0120	0,0079	0,0086	0,0066	0,0075	0,0117	0,0119	0,0134
60	0,0148	0,0140	0,0152	0,0071	0,0117	0,0121	0,0120	0,0077

Referente al TiO₂ en el caso de exposición solar con agitación se puede observar en las figuras 10, 11, 12 y 13, que su cinética de proceso es considerablemente menor que a la de los casos anteriores (privación solar en reposo). A pesar de parecer un resultado erróneo, puesto que estos catalizadores

se activan con luz solar, se puede justificar este comportamiento debido a un error de experimentación.

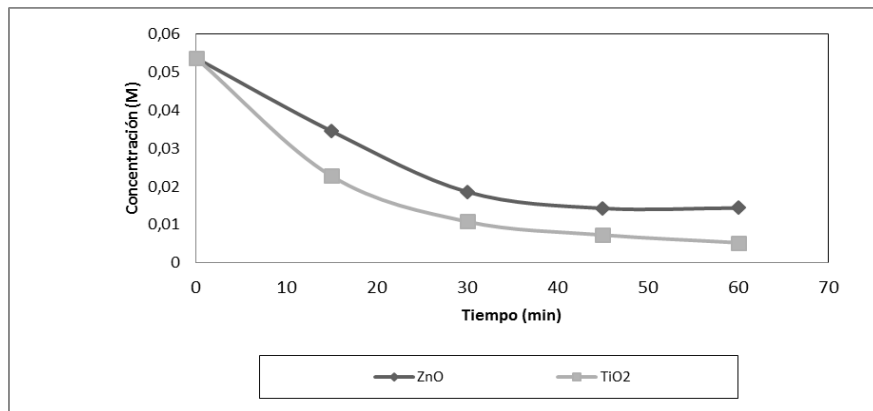


Figura 10. Fotodegradación del Índigo con 0,05 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

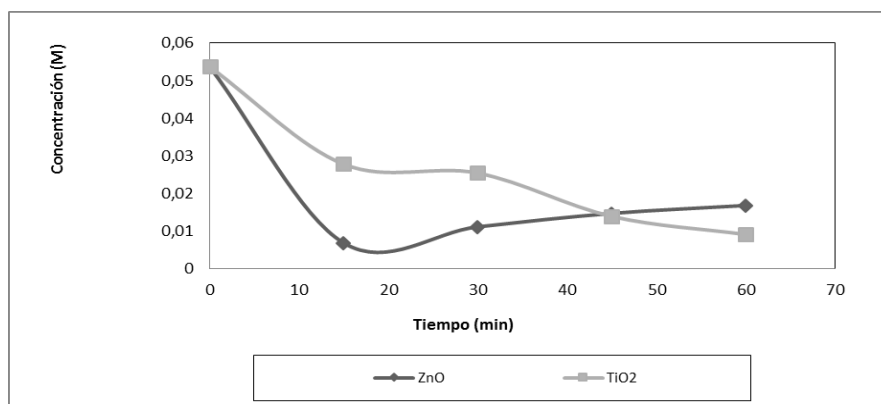


Figura 11. Fotodegradación del Índigo con 0,10 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

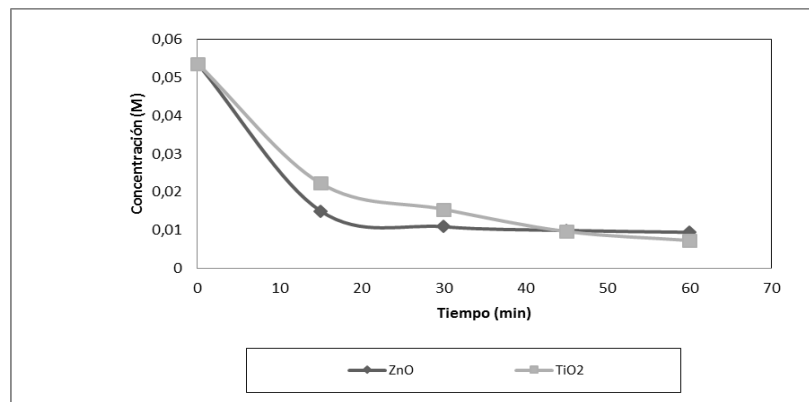


Figura 12. Fotodegradación del Índigo con 0,15 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

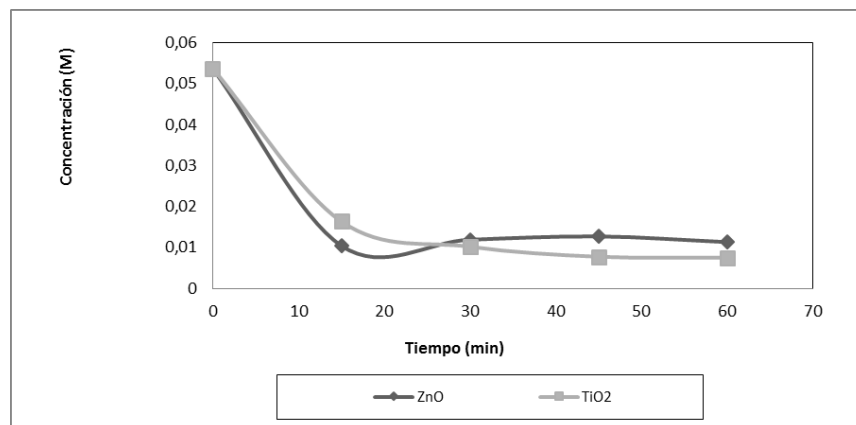


Figura 13. Fotodegradación del Índigo con 0,20 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

El TiO₂ presente en la solución de índigo, al ser agitado tendió a adherirse a la superficie del recipiente, formando una ligera capa de este óxido. La presencia de esta capa desfavorece el proceso de fotodegradación, debido a la ausencia del catalizador en el seno de la solución de índigo, obteniendo una falta de catálisis en la misma. Resultado de esto se infirió que el tamaño de partícula del TiO₂ se encontró en valores minúsculos (impalpable), razón por la cual se dio esta acumulación. Esto se evidenció en el análisis espectrofotométrico de dichas alícuotas, donde su concentración disminuyó en poca proporción.

En cuanto al ZnO, se pueden observar en las figuras 10, 11, 12 y 13, que su cinética de degradación resultó ser mayor que en la del caso de privación solar, con agitación. Esto demuestra que la luz evidentemente mejora la efectividad de un fotocatalizador. Además es necesario aclarar que la tendencia de adhesión del catalizador no se dio con el ZnO, por lo cual se sospechó que el mismo presentaba un tamaño de partícula lo suficientemente grande para que este evitar este fenómeno (Dodd et al, 2007).

Finalmente se puede observar en las figuras 11, 12 y 13, que la concentración óptima de catalizador es 3.33 g/L. Al igual que los demás casos se presume que la acción del catalizador presenta un comportamiento asintótico.

Prueba en reposo y exposición solar

t(min)	1,67 g/L Catalizador		3,33 g/L Catalizador		5,00 g/L Catalizador		6,67 g/L Catalizador	
	Concentración Índigo (M)							
	ZnO	TiO2	ZnO	TiO2	ZnO	TiO2	ZnO	TiO2
0	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537	0,0537
15	0,0345	0,0228	0,0069	0,0278	0,0151	0,0223	0,0104	0,0164
30	0,0186	0,0108	0,0112	0,0254	0,0109	0,0155	0,0119	0,0102
45	0,0143	0,0073	0,0147	0,0139	0,0099	0,0097	0,0127	0,0077
60	0,0144	0,0053	0,0168	0,0091	0,0095	0,0073	0,0113	0,0075

Referente al ZnO en este caso particular, se puede observar en las figuras 14, 15, 16 y 17, que al igual que el caso de privación solar y reposo, su eficiencia como catalizador es prácticamente nula. Por lo cual una vez más se observar que el ZnO requiere de agitación para poner en marcha su acción catalítica.

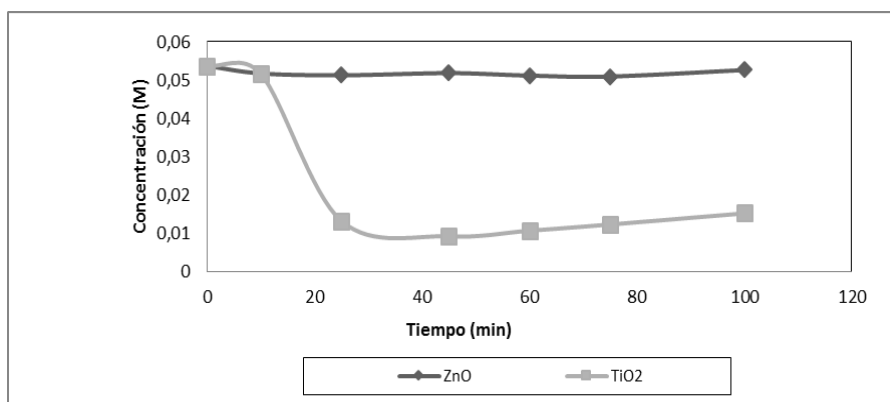


Figura 14. Fotodegradación del Índigo con 0,05 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

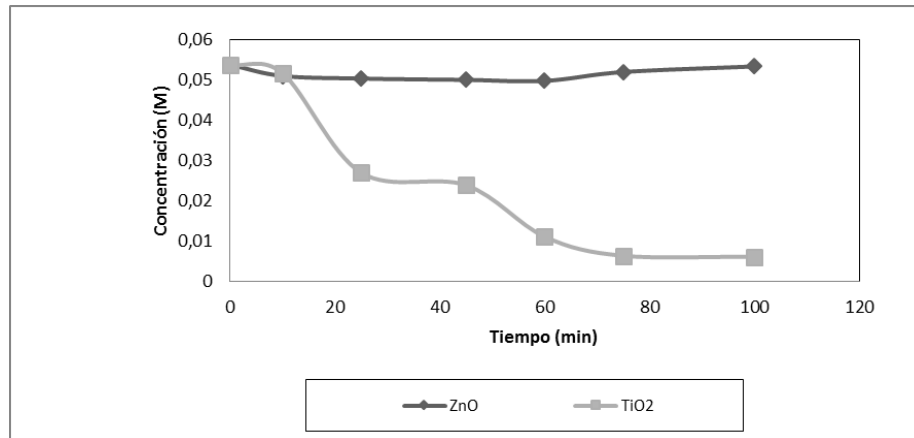


Figura 15. Fotodegradación del Índigo con 0,10 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al TiO₂ se puede observar en las figuras mencionadas anteriormente, que presenta una mayor cinética que el caso de la privación solar, con agitación. Esto ocurrió puesto que en este caso el TiO₂ únicamente concentró gravimétricamente, impidiendo la adherencia a cualquier superficie, por lo cual su presencia en el seno de la solución fue permanente, catalizando la misma eficazmente.

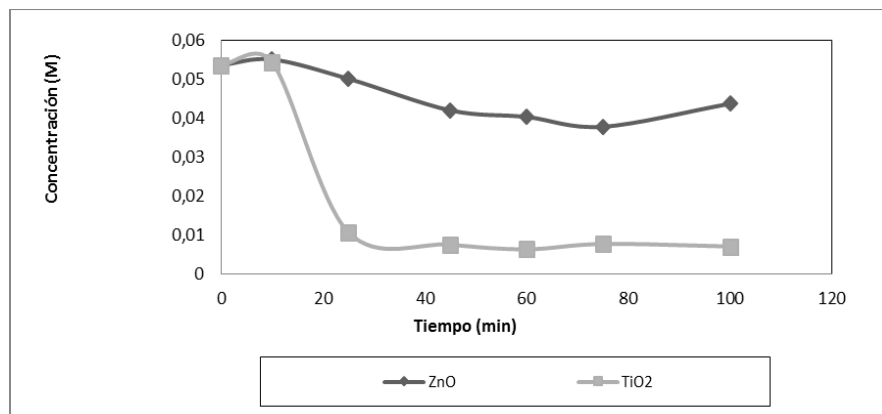


Figura 16. Fotodegradación del Índigo con 0,15 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

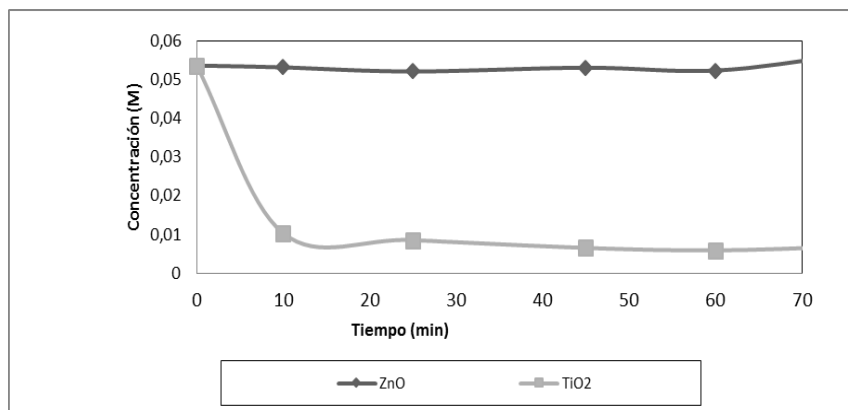


Figura 17. Fotodegradación del Índigo con 0,20 g de catalizador
Fuente: Elaboración propia.

Cinética del Proceso

Se procedió al análisis de la cinética del proceso para la fotodegradación del índigo tanto con el uso del óxido de zinc como el dióxido de titanio como fotocatalizadores utilizando el método diferencial. La Tabla 6 nos indica los valores para la obtención de la cinética de fotodegradación con óxido de zinc, en donde la Constante de la cinética del proceso muestra un valor de $k = 0,030$ $[\text{min}^{-1}]$.

Tabla 6. Determinación de la cinética del proceso de fotodegradación con ZnO

Catalizador 0,05 g de ZnO		
t (min)	C (M)	ln C
0	0,0537	-2,9243
15	0,0345	-3,3668
30	0,0186	-3,9846
45	0,00143	-4,2475
60	0,0144	-4,2405
	k	0,030 $[\text{min}^{-1}]$.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18 se muestra la cinética del proceso de fotodegradación con el óxido de zinc, que se ajusta a la linealización de cinética de primer orden con un coeficiente de correlación de 0,9794 siendo su ecuación: $\ln(C) = -0,0306t - 2,9427$.

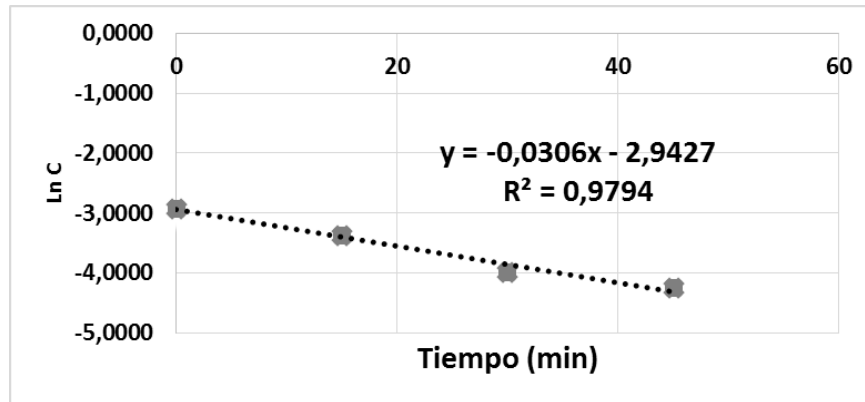


Figura 18. Orden de la cinética de proceso de fotodegradación con ZnO

La Tabla 7 nos indica los valores para la obtención de la cinética de fotodegradación con óxido de titanio, en dónde la Constante de la cinética del proceso muestra un valor de $k = 2,888 \text{ [M}^{-1} \text{ min}^{-1}\text{]}$.

Tabla 7. Determinación del orden de la cinética del Proceso de fotodegradación con TiO₂.

Catalizador 0,05 g de TiO ₂		
t (min)	C (M)	1/C
0	0,0537	18,62
15	0,0228	43,86
30	0,0108	92,59
45	0,0073	136,99
60	0,0053	188,68
	k	2,888 [min⁻¹].

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 19 se observa la cinética del proceso de fotodegradación con el dióxido de titanio, la cual se ajusta a la Linealización de cinética de segundo orden con un coeficiente de correlación de 0,9886 siendo su ecuación $1/C = 2,883t + 9,4997$.

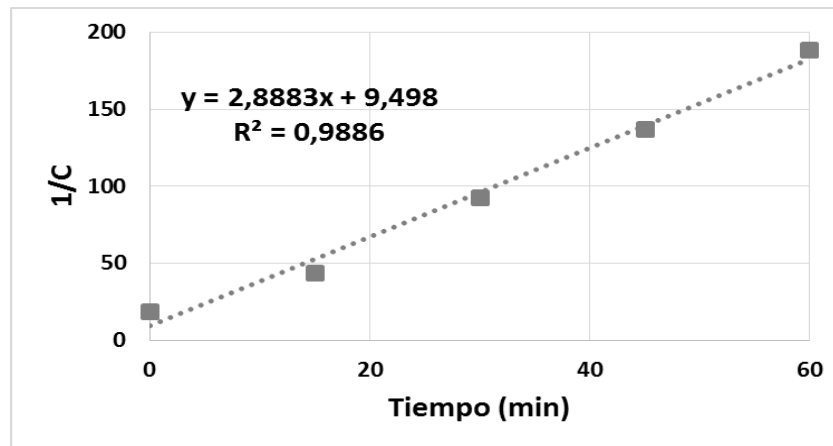


Figura 19. Orden de la cinética de proceso de fotodegradación con TiO_2
Fuente: Elaboración propia.

Las constantes de velocidad obtenidas se reflejan en la Tabla 6 y Tabla 7, mostrando valores para el óxido de zinc y óxido de titanio de $k = 0,030 \text{ [min}^{-1}\text{]}$ y $k = 2,888 \text{ [M}^{-1}\text{ min}^{-1}\text{]}$ respectivamente. Al analizar estos resultados se puede manifestar que las mayores velocidades de reacción están asociadas al uso de láminas como soporte y óxido de titanio, debido a que tienen una mejor eficiencia de transferencia, captura de electrones y por lo tanto una mayor degradación (Lucioni y Baudrit, 2012).

Conclusiones

- El ZnO en condiciones de reposo, este o no expuesto a la luz solar, no degrada de forma eficiente el colorante estudiado, por lo que se concluye que la efectividad de este catalizador depende de la agitación o reposo.
- El TiO_2 en condiciones de agitación presenta resultados de fotodegradación del colorante inferiores que en condiciones de reposo, esto se debe a la ausencia del catalizador en el seno de la solución, puesto que este presenta una tendencia adherente a superficies lisas como el vidrio debido a su minúsculo tamaño de partícula.
- El ZnO no presentó este fenómeno de adherencia, debido a su tamaño de partícula más grande, dejando aparte las variables de agitación, el ZnO evidentemente mejora su efectividad mediante la incidencia de luz solar.
- El TiO_2 sin agitación y en presencia de luz solar, presentó una mayor degradabilidad del índigo que en sus demás condiciones.

- El ZnO con agitación y en presencia de luz solar, presente una mayor degradabilidad del índigo que en sus demás condiciones.
- El efecto fotocatalítico presenta un comportamiento asintótico, es decir, a partir de una cierta concentración de catalizador, la cinética de la reacción permanece constante.

Referencias

1. Atkins, P.W. (1986). Físicoquímica, 3^o Edición, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. USA.
2. Barka, N., Assabbane, A., Nounah, A. y Ait Ichou, Y. (2007). Photocatalytic degradation of indigo carmine in aqueous solution by TiO₂-coated non-woven fibres. Hay Dakhla, Agadir, Marruecos.
3. Dodd, A., McKinley, A., Saunders, M. y Tsuzuki, T. (2005). Effect of particle size on the photocatalytic activity of nanoparticulate zinc oxide. University of Western Australia, Australia.
4. Gil, E. y Molina, K. (2006). Aplicación de los sistemas fotocatalíticos para la destrucción de compuestos orgánicos y otras sustancias en fuentes hídricas. Grupo de Investigación en Procesos Ambientales y Biotecnológicos (GIPAB), Medellín, Colombia.
5. Lucioni, A. y Baudrit, J. (2012). Estudio Cinético de la degradación fotocatalítica oxidativa de colorants empleados en la industria textilera. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Costa Rica.
6. Pubiano, C. y Laguna, W. (2004). Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatálisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
7. Garcia, F. J. C., & Souza, R. (2016). Photocatalytic activity of TiO₂, ZnO and Nb₂O₅ applied to degradation of textile wastewater. *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry.* <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.06.013>
8. Hidalgo, D., & Hernández, S. (2014). Comparison of photocatalytic and transport properties of TiO₂ and ZnO nanostructures for solar driven water splitting. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2, 13. <https://doi.org/10.1039/C4CP05857G>
9. Lebeau, B., Jonas, F., Gaudin, P., Bonne, M., Lebeau, B., Jonas, F., ... Depollution, J. B.

- D. (2020). *Dyes Depollution of Water Using Porous TiO₂-Based Photocatalysts*.
10. Manjarres, J. (2019). *Evaluación de la actividad fotocatalítica de la mezcla TiO₂/ZnO en la remoción de azul de metileno*.
11. Quintero, L. (2010). Índigo e índigo carmín technologies for the decolorization of dyes : indigo and indigo carmine. *Facultad de Minas*, 371–386.
12. Zaruma, P., Proal, J., & Hernández, I. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual : Una Breve Revisión Textile Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatments : A short review, 38–47.