

Tratamiento fotocatalítico de aguas residuales generadas en laboratorios con presencia del indicador verde de bromocresol*

David Alejandro Mera Benavides**, Adriana Consuelo Mera Benavides***

Resumen

Introducción. El avance de la fotocatalisis heterogénea como un proceso de oxidación avanzada se ha utilizado en el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias recalcitrantes, que provocan impactos negativos al ambiente y, por consiguiente, a la salud humana. Debido a la urgente necesidad de preservar el recurso hídrico, en esta investigación, se utilizó la fotocatalisis heterogénea para el tratamiento de efluentes generados en laboratorios de análisis químico y ambiental. **Objetivo.** Aplicar la fotocatalisis heterogénea mediante la utilización TiO_2 para el tratamiento de las aguas residuales con presencia del indicador verde de bromocresol. **Materiales y métodos.** En este proceso se utilizaron reactores tipo Batch; como catalizador, dióxido de titanio (TiO_2) Degussa P-25, y radiación UV natural como fuente de activación del método fotocatalítico, para generar la decoloración y mineralización del indicador verde de bromocresol en los efluentes líquidos. El seguimiento del proceso se realizó mediante pruebas de pH, absorbancia a través de un espectrofotómetro (longitud de onda de 418 nm) y DQO mediante la técnica sugerida por el *métodos estándar*, cada día en un espacio de tiempo de cinco días. **Resultados.** La comparación de datos obtenidos muestra la viabilidad de la técnica, especialmente utilizando una concentración de 300 ppm de catalizador, donde se obtienen porcentajes de degradación de 93,94% y mineralización de 72,22%. **Conclusión.** Con los resultados obtenidos de porcentaje de degradación y mineralización se muestra que la fotocatalisis heterogénea, utilizando radiación solar, es un proceso de oxidación avanzada viable para el tratamiento de aguas residuales, con presencia del indicador verde de bromocresol.

Palabras clave: degradación, dióxido de titanio, fotocatalisis heterogénea, mineralización, radiación UV natural, verde de bromocresol.

Photocatalytic treatment of waste water from laboratories with bromocresol green indicator

Abstract

Introduction. The advance of heterogeneous photocatalysis as an advanced oxidation process has been used in the treatment of water contaminated with recalcitrant substances, which bring negative impacts to the environment and, in consequence, to human health. Given the urgent necessity of preserving water as a natural resource, heterogeneous photocatalysis was used in this research work to treat effluents generated in chemical and environmental research laboratories. **Objective.** To apply heterogeneous photocatalysis by the use of TiO_2 to treat waste water with bromocresol green. **Materials and methods.** Batch type reactors were used in this process. Titanium dioxide (TiO_2) Degussa P-25 was used as a catalyst and natural UV radiation was taken as the source to activate the photocatalytic method to generate the discoloration and mineralization of the bromocresol green indicator in the liquid effluents. The process was followed up by pH tests; Absorbance by the use of a spectrophotometer (418 nm wave length) and COD by the technique suggested by *Standard Methods*, every day during a five days period. **Results.** The comparison of the data obtained shows the feasibility of the technique, especially by the use of a 300 ppm concentration of catalyst, obtaining a 93,94% of degradation and a 72.22% of mineralization. **Conclusion.** With the

* Artículo derivado del macroproyecto de investigación "Procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de residuos líquidos con presencia de sustancias indicadoras generados en los laboratorios de la Universidad del Magdalena". Trabajo de Investigación realizado entre enero de 2009 y abril de 2010 y financiado por la vicerrectoría de investigación de la Universidad del Magdalena, Sede Santa Marta.

** Estudiante Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad del Cauca. Miembro del Grupo de Investigación en Residuos Peligrosos y Sólidos Urbanos (GIRPSU), Universidad del Magdalena. Institución en la que labora: Universidad del Cauca.

*** Docente Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad del Magdalena. Líder del Grupo de Investigación en Residuos Peligrosos y Sólidos Urbanos (GIRPSU), Universidad del Magdalena. Institución en la que labora: Universidad del Magdalena.

Correspondencia: David Alejandro Mera Benavides e-mail: davidalejandro2006@hotmail.com.

Artículo recibido: 09/08/2010; Artículo aprobado: 25/04/2011

results of degradation and mineralization percentages obtained, it is evident that heterogeneous photocatalysis, using sunlight, is an advanced oxidation process useful to treat waste water with bromocresol green indicator.

Key words: degradation, titanium dioxide, heterogeneous photocatalysis, mineralization, natural UV radiation, bromocresol green.

Tratamiento fotocatalítico de aguas residuales geradas en laboratorios con presencia de indicador verde de bromocresol

Resumo

Introdução. O avanço da foto-catálisis heterogênea como um processo de oxidação avançada se utilizou no tratamento de águas contaminadas com substâncias recalcitrantes, que provocam impactos negativos ao ambiente e, portanto, à saúde humana. Devido à urgente necessidade de preservar o recurso hídrico, nesta investigação, utilizou-se a foto-catálisis heterogênea para o tratamento de efluentes gerados em laboratórios de análise química e ambiental. **Objetivo.** Aplicar a foto-catálisis

heterogênea mediante a utilização TiO_2 para o tratamento das águas residuais com presença do indicador verde de bromocresol. **Materiais e métodos.** Neste processo se utilizaram reatores tipo Batch; como catalisador, dióxido de titânio (TiO_2) Degussa P-25, e radiação UV natural como fonte de ativação do método foto-catalítico, para gerar a descoloração e mineração do indicador verde de bromocresol nos efluentes líquidos. O seguimento do processo se realizou mediante provas de PH, absorvância através de um espectrofotômetro (longitude de onda de 418 nm) e DQO mediante a técnica sugerida pelos métodos regulares, cada dia num espaço de tempo de cinco dias. **Resultados.** A comparação de dados obtidos mostra a viabilidade da técnica, especialmente utilizando uma concentração de 300 ppm de catalisador, onde se obtêm porcentagens de degradação de 93,94% e mineração de 72,22%. **Conclusão.** Com os resultados obtidos de porcentagem de degradação e mineração se mostra que a foto-catálisis heterogênea, utilizando radiação solar, é um processo de oxidação avançada viável para o tratamento de águas residuais, com presença do indicador verde de bromocresol.

Palavras importantes: degradação, dióxido de titânio, foto-catálisis heterogênea, mineração, radiação UV natural, verde de bromocresol.

Introducción

El calentamiento global el cual esta generando el cambio climático, es un fenómeno transcendental en la historia; el mismo ha llevado a diversos conflictos e inquietudes, los cuales abarcan desde el ambiente hasta la sociedad¹. Una de las consecuencias del surgimiento de este cambio en nuestro planeta es la escasez del agua, pero este problema se presenta desde hace mucho tiempo, incluso antes de que el calentamiento global se hiciera más notorio. El mal uso de este recurso natural ha venido generándose de diversas maneras, una de ellas ha sido el vertimiento de residuos peligrosos a cuerpos de agua (lagos, lagunas, ríos, mares, océanos, entre otros); se suma a esta problemática que muchos de los actores intelectuales de estas acciones, la población, no tienen una sensibilización sobre el daño que se le está realizando al ambiente y, por consiguiente, a los seres humanos con este tipo de prácticas inadecuadas².

La contaminación del recurso hídrico en Colombia, con residuos peligrosos, es respon-

sabilidad en gran medida de los sectores industriales, ubicados en ciudades principales (Bogotá D. C., Medellín y Santiago de Cali)³; aunque el porcentaje de contaminación puede considerarse bajo con respecto a otros países, este genera un impacto negativo potencial al ambiente.

Un ejemplo es el caso de las aguas residuales generadas en las universidades, especialmente en laboratorios de análisis químico, biológico y ambiental, donde el reactivo más utilizado es el agua, y generalmente es contaminada con otros reactivos (solubles o insolubles) como ácidos, bases, sales, indicadores, colorantes, entre otras sustancias. Estos residuos líquidos químicos son producidos a diario en actividades de docencia, investigación y extensión, y, en su mayoría no son tratados⁴; un elevado porcentaje de ellos es vertido a los desagües, lo que genera problemas a corto o largo plazo⁵ como eutrofización, bioacumulación, magnificación en la cadena trófica, entre otros problemas ambientales, situación que hace que el re-

curso hídrico en nuestro país pierda su calidad poco a poco⁶. El contexto es más crítico, si se considera que sólo el 9% de las aguas residuales en Colombia reciben tratamiento antes de verterse a las fuentes hídricas⁷.

Una técnica que está teniendo auge para el tratamiento de aguas residuales es la fotocatalisis heterogénea⁸, que es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de fotones de luz visible o UV, por un sólido, que normalmente es un semiconductor⁹, con energía suficiente, igual o superior a la energía del gap (E_{gap}) del semiconductor. E_{gap} es la diferencia de energías entre el mínimo de la banda de conducción E_c y el máximo de la banda de valencia E_v en un semiconductor¹⁰. Las reacciones de oxidación o reducción se presentan en la superficie del sólido excitado o en la región interfacial entre el sólido excitado

y la solución, sin que el catalizador (el sólido) sufra cambios químicos¹¹. En estas reacciones existe una transferencia de electrones que va de la banda de valencia, a la banda de conducción, lo cual genera un orificio de carga positiva en la ya nombrada banda de valencia; luego sucede una interacción entre los electrones transferidos con iones hidróxido y agua para formar radicales libres $\cdot\text{OH}$ ¹². En la banda de conducción, los electrones y el oxígeno (O_2) interactúan para producir el superóxido ($\cdot\text{O}_2^-$), al igual que lo hacen con el peróxido de hidrógeno (agua oxigenada H_2O_2) generando radicales libres $\cdot\text{OH}$ (figura 1)¹³.

Técnicamente, la fotocatalisis heterogénea consiste en producir radicales libres, para obtener la eliminación de compuestos orgánicos y/o inorgánicos presentes en aguas, debido a los procesos de degradación, mineralización y reducción de metales que pueden generarse¹⁴.

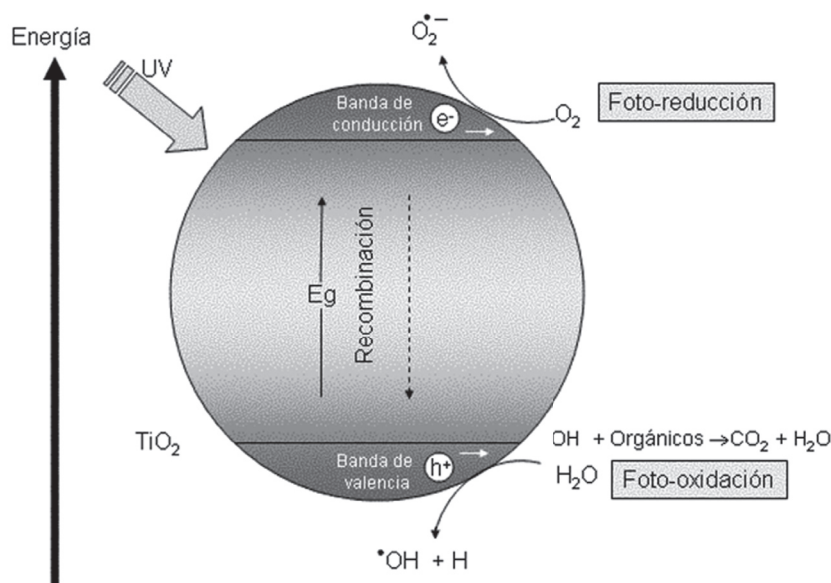


Figura 1. Diagrama del Proceso de Oxidación Avanzada de Fotocatalisis Heterogénea¹⁵.

La técnica de fotocatalisis heterogénea se ha utilizado para la descontaminación de aguas residuales, que contienen colorantes e indicadores, debido a que este proceso de oxidación avanzada genera la degradación y mineralización de estos contaminantes en muchos efluentes líquidos. Es importante destacar que este proceso es viable, ya que posee un bajo costo

al utilizar una fuente inagotable y gratuita como es la radiación solar; igualmente, es sostenible debido a que el catalizador utilizado (dióxido de titanio (TiO_2) Degussa P-25) es un reactivo relativamente económico y no tóxico¹⁶.

En esta investigación, se estudió la aplicación de la fotocatalisis heterogénea para el

tratamiento de aguas residuales con presencia del indicador tetrabromometacresolsulfonftaleína o más conocido con el nombre de verde de bromocresol (figura 2) y químicamente denominado por la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) como 2,6-dibromo-4-[7-(3,5-dibromo-4-hidroxi-2-metil-fenil)-9,9-dioxo-8-oxa-9,6-tiobicliclonona-1,3,5-trien-7-il]-3-metil-fenol(3,3',5,5'-tetrabro-

mo-m-cresolsulfonftaleína). Este compuesto tiene diversas utilidades en pruebas de carácter químico, ambiental y biológico; por ejemplo: es empleado como colorante de seguimiento para la electroforesis en gel de agarosa de ADN¹⁷, es un indicador ácido-base útil en los análisis de alcalinidad de aguas¹⁸ y en pruebas de medio de contraste para la determinación de albúmina sérica¹⁹⁻²⁰.

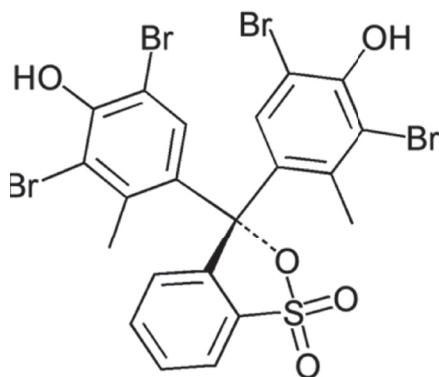


Figura 2. Estructura molecular del Verde de Bromocresol ($C_{21}H_{14}Br_4O_5S$)²¹.

El presente trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Universidad del Magdalena, donde se prepararon desechos sintéticos con presencia del indicador verde de bromocresol, con características físicas y químicas similares a los generados en los ensayos de alcalinidad de aguas realizados a diario en esta unidad generadora.

Materiales y métodos

Recolección y tratamiento de los residuos

Para el desarrollo de esta investigación se recolectaron desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Universidad del Magdalena, generados en los ensayos de alcalinidad de aguas, en un periodo de tiempo de dos semanas; luego se evaluaron sus propiedades físicas y químicas como: volumen, pH, demanda química de oxígeno (DQO) y concentración del indicador, utilizando la longitud de onda donde la absorbancia fue máxima.

El desecho recolectado presentó un pH de 4,25 unidades y una concentración del indicador verde de bromocresol de 60 ppm; con estos datos se preparó una muestra artificial para cada uno de los reactores, simulando las condiciones del desecho real. Lo anterior se efectuó al no contar con el volumen suficiente y requerido de desecho real para colocar en cada uno de los reactores a usar.

El seguimiento del tratamiento aplicado en los ensayos se hizo mediante la determinación de los porcentajes de degradación y mineralización del indicador verde de bromocresol. El porcentaje de degradación o decoloración de la sustancia se efectuó midiendo la variabilidad de la absorbancia máxima a un pH constante. Esta fue obtenida al hacer un barrido cada 3 nm con un espectrofotómetro en la región UV-Visible (190-800 nm); para ello se utilizó un espectrofotómetro de barrido UV-Vis GENESYS 10, donde la absorbancia máxima del indicador se presentó a la longitud de onda de 418 nm. En la tabla 1 se reportan los valores de las condiciones iniciales que se utilizaron en los reactores para aplicar el tratamiento fotocatalítico.

En esta investigación la concentración del catalizador dióxido de titanio (TiO₂) Degussa P-25 fue el único parámetro variable; los demás pa-

rámetros (pH, volumen de residuo, condición física) en cada uno de los reactores permanecieron constantes.

Tabla 1. Condiciones iniciales del tratamiento fotocatalítico.

Condiciones iniciales del tratamiento.	
Valor de pH (unidades)	4,25
Volumen de residuo en cada reactor (mL)	500
Concentración de dióxido de titanio (TiO ₂) Degussa P-25 (ppm).	0
	100
	300
	500
Condición física.	Sin aireación.

Para esta investigación, se utilizaron reactores tipo Batch sin recirculación; cada reactor es un contenedor plástico con capacidad para 500 mL de residuo sintético. Estos reactores fueron colocados sobre una superficie plástica en forma

de caparazón, la cual estaba recubierta con un material reflectante, para lograr con este material, una mayor captación de radiación solar y así obtener un proceso más eficiente (foto 1).



Foto 1. Reactores Batch utilizados.

Los residuos utilizados en esta investigación fueron sintéticos; para cada reactor se prepararon 500 mL de residuo sintético; se utilizó un volumen de 497 mL de agua desionizada; a cada volumen de agua se le agregaron 3 mL de la solución del indicador verde de bromo-

cresol a una concentración del 1% (p/v). El pH de la mezcla se ajustó a 4,25 unidades, utilizando ácido sulfúrico (H₂SO₄) 1 N o hidróxido de sodio (NaOH) al 0,01 N, según el caso. Es importante destacar que cada vez que se presentó una modificación del pH en las unidades

experimentales, este fue ajustado al valor de 4,25 unidades. En esta investigación se trabajó a un valor de pH constante en el proceso fotocatalítico y para el análisis de los parámetros; sin embargo, se hizo el seguimiento de esta variable para conocer el posible carácter ácido o básico de los compuestos intermediarios que se originan por la ruptura del indicador, presente en los residuos al aplicar el tratamiento.

Los 12 reactores fueron llevados a la estación meteorológica del IDEAM, ubicada dentro de la granja de la Universidad del Magdalena. Este trabajo tuvo una duración de cinco días, cada día se tomó en cada uno de los reactores una muestra de 25 mL, la cual fue centrifugada para retirar el catalizador por espacio de 30 minutos a 3200 rpm en una Centrífuga Analítica Clay Adams Compact II; luego de retirar el catalizador de cada una de las muestras, se midió el pH y se ajustó este parámetro a 4,25 unidades, si era necesario; después se determinó en cada una de las muestras la absorbancia a la longitud de onda de 418 nm. Este parámetro permitió hacer el seguimiento de degradación y decoloración durante el proceso.

Los valores de DQO fueron medidos en todas las muestras por el método de reflujo cerrado utilizando titulación según el Standard Methods 5-17²²⁻²³. La prueba de DQO es una herramienta bastante útil para conocer el oxígeno (O₂) necesario para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua; si esta cantidad de oxígeno disminuye en el transcurso de un tratamiento fotocatalítico, permite definir que el tratamiento es eficaz y que la mineralización de la sustancia contaminante se está llevando a cabo²⁴.

Para la obtención de los valores de pH, se utilizó un pH-Metro 744 Metrohm; de esta manera se obtuvieron resultados precisos, ya que este dispositivo digital maneja cuatro cifras significativas para la determinación del pH.

El modelo estadístico planteado para evaluar la degradación y mineralización del contaminante se fundamentó en un diseño de bloques aleatorizados²⁵:

$$y_{ij} = \mu + \tau_j + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Donde:

y_{ij} : variable respuesta observada en el tratamiento j, bloque i.

μ : media global de la degradación o mineralización.

τ_j : efecto del tratamiento.

β_j : efecto del bloque i.

ϵ_{ij} : variación aleatoria asociada al tratamiento j en la repetición i.

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó un total de 12 unidades experimentales (reactores), 3 para cada una de las concentraciones empleadas del catalizador (0, 100,300 y 500 ppm). Para obtener datos representativos de cada unidad experimental, se tomó una muestra, a la cual se le determinaron por triplicado los parámetros de pH, color y DQO. A los resultados obtenidos de cada parámetro analizado en las muestras, se les hizo promedio estadístico, análisis de varianza (tablas 2 y 3) con un intervalo de confianza del 95% de aceptación.

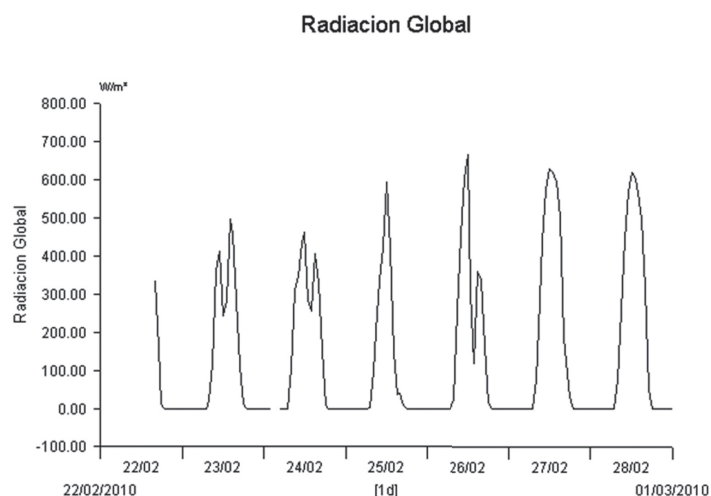
Posteriormente, los cálculos estadísticos se realizaron aplicando un análisis de varianza simple con la tabla ANOVA, obtenidos mediante la utilización del software StatGraphics Centurion Data Analysis and Statistical. Lo anterior se realizó para evaluar las diferencias significativas entre los porcentajes obtenidos con las diferentes concentraciones. Igualmente, se graficaron las medias estadísticas de los porcentajes obtenidos para cada una de las concentraciones utilizadas de catalizador en el proceso fotocatalítico, teniendo como variable dependiente los porcentajes, y como variable independiente el tiempo (porcentajes frente a tiempo), con el fin de observar de manera clara las variaciones de los porcentajes de degradación y mineralización que se presentaron al transcurrir el tratamiento.

Resultados

En la gráfica 1, se reportan los valores de radiación solar en la ciudad de Santa Marta (Co-

lombia), en el período comprendido entre el 22 de febrero de 2010 al 27 de febrero de 2010 (tiempo cronológico de duración de la investi-

gación), los cuales fueron medidos y proporcionados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).



Gráfica 1. Radiación solar frente a tiempo en la ciudad de Santa Marta (Colombia) durante los días del desarrollo del proceso fotocatalítico.

A continuación se reportan los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente investigación, los cuales fueron calculados mediante la aplicación de métodos de análisis estadístico, matemático y geométrico.

Los datos de absorbancia al utilizar diferentes concentraciones de catalizador dióxido de titanio (TiO_2) Degussa P-25, con sus respectivos intervalos de confianza, se reportan en la tabla 2, la utilización del espectrofotómetro de barrido UV-Vis GENESYS 10, un equipo de alta precisión, mostró el comportamiento de la decoloración de los residuos en el transcurso del proceso.

Los cálculos del comportamiento de la DQO en el proceso fotocatalítico utilizando diferentes concentraciones de catalizador se presenta en la tabla 3. A este parámetro igualmente se le calcularon los intervalos de confianza. Los resultados de porcentaje de mineralización obtenidos tuvieron un comportamiento similar a los valores correspondientes para la absorbancia, debido a que en el transcurso del tiempo, los valores de mineralización fueron decreciendo,

mostrando así la eficiencia del tratamiento utilizado.

Los cálculos realizados (tablas ANOVA) mediante el software StatGraphics Centurion Data Analysis and Statistical, para el análisis de varianza de los porcentajes de degradación y mineralización, se reportan en las tablas 4 y 5, respectivamente.

Los porcentajes de degradación, mineralización y las respectivas tablas y gráficas fueron calculados estadística y geométricamente utilizando el software de Microsoft Office Excel 2007. Estos datos se reportan en las gráficas 2 y 3, y tablas 6 y 7, donde se muestran los cambios en porcentaje de absorbancia y DQO en el tratamiento, utilizando diferentes concentraciones de catalizador en el transcurso del tiempo.

La comparación de los porcentajes de degradación y mineralización en el último día del tratamiento, utilizando las diferentes concentraciones de catalizador, se presentan en la tabla 8. La gráfica 4 muestra la variación de los valores de pH de los residuos sintéticos en el transcurso del proceso fotocatalítico (5 días).

Tabla 2. Valores de absorbancia obtenidos en el proceso fotocatalítico al utilizar diferentes concentraciones de catalizador.

Comportamiento de la absorbancia.				
Tiempo	Concentración del dióxido de titanio (TiO₂) Degussa P – 25			
Días	0 ppm	100 ppm	300 ppm	500 ppm
0	0,311±0,2%	0,228±0,2%	0,363±0,3%	0,362±0,7%
1	0,301±0,3%	0,086±0,8%	0,215±2,4%	0,255±8,5%
2	0,298±0,3%	0,073±0,6%	0,108±0,3%	0,191±0,5%
3	0,296±0,6%	0,068±1,1%	0,067±1,8%	0,109±2,5%
4	0,265±3,3%	0,046±1,1%	0,029±0,2%	0,065±2,8%
5	0,249±0,1%	0,038±0,8%	0,022±0,5%	0,035±0,7%

Tabla 3. Valores calculados DQO en el proceso fotocatalítico obtenidos al usar diferentes concentraciones de catalizador.

Comportamiento de la DQO (mgO₂/L).				
Tiempo	Concentración del dióxido de titanio (TiO₂) Degussa P – 25			
Días	0 ppm	100 ppm	300 ppm	500 ppm
0	31±1,1%	76±4,5%	72±9,1%	68±4,5%
1	31±1,1%	60±4,5%	62±2,3%	44±4,5%
2	31±1,1%	36±13,6%	56±9,1%	40±0,0%
3	31±1,1%	24±0,0%	48±9,1%	20±4,5%
4	29±1,1%	24±0,0%	40±9,1%	16±0,0%
5	29±1,1%	16±0,0%	20±4,5%	16±0,0%

Tabla 4. Análisis de varianza del porcentaje de degradación con diferentes concentraciones de catalizador.

Factor	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	14625,2	3	4875,06	15,91	0,0000
Sin grupos	4902,91	16	306,432		
Total (Corr.)	19528,1	19			

Tabla5. Análisis de varianza del porcentaje de mineralización con diferentes concentraciones de catalizador.

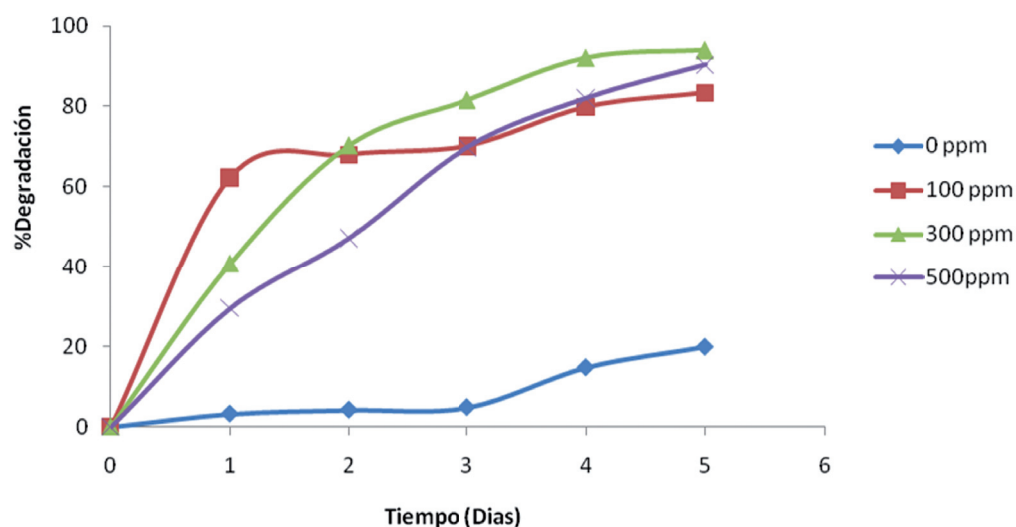
Factor	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	10634,3	3	3544,75	9,81	0,0007
Sin grupos	5781,06	16	361,316		
Total (Corr.)	16415,3	19			

Tabla 6. Porcentaje de Degradación en el proceso fotocatalítico.

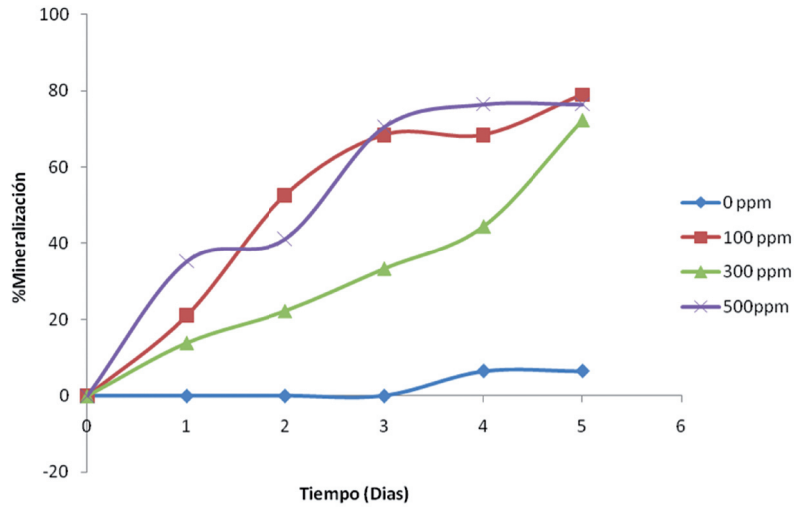
Tiempo Días	Porcentaje de degradación (%)			
	0 ppm	100 ppm	300 ppm	500 ppm
0	0	0	0	0
1	3,22	62,28	40,77	29,56
2	4,18	67,98	70,25	47,24
3	4,82	70,18	81,54	69,89
4	14,79	79,82	92,01	82,04
5	18,57	83,33	93,94	90,33

Tabla 7. Porcentaje de mineralización en el proceso fotocatalítico.

Tiempo Días	Porcentaje de mineralización (%)			
	0 ppm	100 ppm	300 ppm	500 ppm
0	0	0	0	0
1	0	21,05	13,89	35,29
2	0	52,63	22,22	41,18
3	0	68,42	33,33	70,59
4	6,45	68,42	44,44	76,47
5	6,45	78,95	72,22	76,47



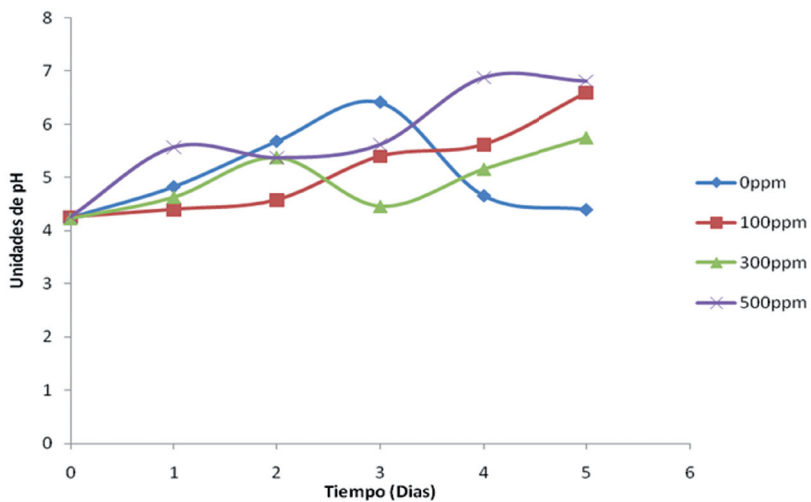
Gráfica 2. Porcentaje de degradación o decoloración de los residuos sintéticos, durante un periodo de cinco días de proceso fotocatalítico, utilizando diferentes concentraciones de Dióxido de Titanio (TiO₂) Degussa P-25.



Gráfica 3. Porcentaje de mineralización de los residuos sintéticos, durante un periodo de cinco (5) días de proceso fotocatalítico, con las diferentes concentraciones de dióxido de titanio (TiO₂) Degussa P-25 utilizadas.

Tabla 8. Porcentaje de degradación y mineralización en el último día del proceso fotocatalítico.

Parámetros	Concentraciones de dióxido de titanio (TiO ₂) Degussa P-25			
	0 ppm	100 ppm	300 ppm	500 ppm
(%)Degradación	18,57	83,33	93,94	90,33
(%) Mineralización	6,45	78,95	72,22	76,47



Gráfica 4. Comparación del comportamiento de pH, en el proceso fotocatalítico durante los cinco días de tratamiento.

Discusión

Debido a que la investigación se realizó en la ciudad de Santa Marta (Colombia), las condiciones geográficas de aquella zona del país generan ventajas para el desarrollo de este trabajo; las dos más importantes se centran en que la ciudad se encuentra en la costa atlántica de Colombia y posee una altitud de 6 msnm²⁶. Por consiguiente, se obtiene una mayor radiación solar que en otras ciudades del país. Lo anterior permitió que el proceso aplicado se desarrollara relativamente rápido.

En la gráfica 1, se muestra el tiempo como variable independiente; este se presenta en días con fecha cronológica; la radiación solar es la variable dependiente y se reporta en unidades de W/m^2 , donde W son Vatios (Watts) de potencia; esta unidad indica la cantidad de potencia solar por cada metro cuadrado de superficie de la Tierra²⁷⁻²⁸. Los promedios de radiación UV natural (W/m^2) obtenidos cada 60 minutos (cada hora) se reportan también en la gráfica 1.

La mayor radiación solar en el tiempo utilizado para el desarrollo de la investigación se presentó al cuarto día del tratamiento fotocatalítico, superando los $600 W/m^2$. Igualmente se aprecia que la mayor irradiación en cada uno de los días de experimentación se encuentra entre los intervalos de tiempo de 12:00 meridiano a 2:00 pm, en donde los valores fluctuaron entre los 500 y $600 W/m^2$ y, por ende, en estas horas del día posiblemente se genera una mayor velocidad en la degradación y mineralización del contaminante.

El análisis de las tablas ANOVA muestra que cuando varía la concentración de catalizador (0, 100, 300 y 500 ppm), tanto para la degradación como para la mineralización del indicador, con un 95% en el nivel de confianza, los datos presentan variabilidad significativa entre sí, dado que el valor de P obtenido en el análisis es menor a 0.05 (tablas 4 y 5).

Los datos obtenidos y la estadística aplicada muestran que el mayor porcentaje de decoloración o degradación corresponde a la concentración de 300 ppm del catalizador (Tabla 8 y Gráfica 2), obteniéndose un porcentaje de 93,94% de degradación en el último día de es-

tudio (quinto día). Aunque es importante destacar que al utilizar las concentraciones de 100 ppm y 500 ppm de catalizador, se presentaron también altos porcentajes correspondientes al 83,33% y de 90,33%, respectivamente.

Con respecto a la concentración de 0 ppm (sin presencia de catalizador), esta presentó un comportamiento diferente frente a los demás reactores que poseían catalizador; al no contener presencia del dióxido de titanio (TiO_2) Degussa P-25, esta concentración generó un porcentaje de degradación muy bajo, llegando en el quinto día a un porcentaje cercano al 19% de decoloración, lo que indica que el verde de bromocresol sin presencia de catalizador y expuesto directamente a la radiación solar no se degrada. Se hace necesaria entonces una interacción entre el catalizador y la radiación para obtener una alta eficiencia en el tratamiento utilizado²⁹.

Respecto a la DQO, de manera estadística y gráfica (tabla 8 y gráfica 3), se muestra algo muy similar a lo anteriormente expuesto para el parámetro de degradación: el mayor porcentaje de mineralización, en el último día, corresponde a la concentración de 100 ppm de catalizador, con un porcentaje de 78,95%; las concentraciones de 300 ppm y 500 ppm, generan una mineralización de 72,22% y 76,47%, respectivamente; es importante destacar que para este parámetro la mejor dosis de catalizador corresponde a 100 ppm; sin embargo, debido a que los intervalos de confianza de los datos obtenidos de DQO para 300 ppm muestran baja confiabilidad de los datos experimentales, no es posible asegurar con precisión el valor de mineralización para esta concentración. Es importante mencionar que la técnica de DQO no arroja datos muy confiables porque al ser una titulación, los valores experimentales dependerán de la apreciación del experimentador al cambio de color en el punto final. De esta manera, los valores de volumen de titulante podrían variar incluso en una serie de muestras idénticas; es por ello que en la actualidad se prefiere utilizar equipos más precisos y exactos como el TOC. Lamentablemente nuestra ciudad carece en la actualidad de un equipo tan novedoso y costoso como este.

Para lograr mineralización del contaminante en este caso, siempre debe existir catalizador,

porque al no utilizar catalizador (0 ppm), como lo muestra esta investigación, los valores obtenidos son cercanos al 0%, mientras si se compara con los datos obtenidos en tan solo un día de tratamiento utilizando catalizador, la mineralización presenta un porcentaje relativamente eficiente. A medida que transcurren los días de tratamiento, se presenta un incremento de la eficacia en el proceso de mineralización; con los resultados obtenidos se determina que la eficiencia del tratamiento y el tiempo son directamente proporcionales.

Igualmente, es necesario destacar que a mayor concentración de catalizador no se obtiene un mayor porcentaje de decoloración; lo anterior se presenta debido a que al utilizar concentraciones muy elevadas del catalizador la acción de la radiación UV puede disminuir, inhibiendo la activación del catalizador y disminuyendo de esta manera la degradación del contaminante³⁰.

El parámetro pH en esta investigación presentó diversas fluctuaciones en el tiempo. Estos resultados son bastante importantes, debido a que ayudan a definir, qué carácter ácido o básico pueden tener los productos intermedios formados durante el tratamiento. Al analizar los resultados de la gráfica 4, se observa que todos los residuos empezaron con un pH aproximadamente de 4,25 unidades, y poco a poco estos valores fueron cambiando. La tendencia general en cada una de las concentraciones utilizadas es que este parámetro aumente con el tiempo, acercándose a valores entre 6 y 7 unidades; esto posiblemente sugiere que la ruptura del indicador verde de bromocresol está generando sustancias de carácter básico. En el caso de la concentración de 0 ppm, se muestra que este parámetro sube, y que al transcurrir el tratamiento, el pH va bajando, y se va acercando a su pH inicial. Se puede considerar que esta sustancia contaminante, al interactuar únicamente con radiación solar, posiblemente genere como intermedios sustancias de carácter ácido. Sin embargo, lo anterior debe corroborarse con análisis y estudios utilizando técnicas más avanzadas como HPLC y cromatografía de gases masa³¹.

Conclusiones

La fotocatalisis heterogénea mediante la utilización de radiación solar, como se demostró

en esta investigación, es una técnica adecuada y viable para el tratamiento de los residuos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol, generados en laboratorios de análisis químico y ambiental de la Universidad del Magdalena.

La estandarización del proceso fotocatalítico, bajo las condiciones de experimentación utilizadas, determinó que la concentración más adecuada de dióxido de titanio (TiO₂) Degussa P – 25 para el tratamiento de los desechos es 300 ppm, debido a que esta permitió obtener altos porcentajes de decoloración y mineralización del indicador, 93,94% y de 72,22%, respectivamente.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de profesionales que permitieron el desarrollo y la culminación de la presente investigación, al Director del Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Ingeniero Sanitario Álvaro León Castillo Miranda, por permitir mi estancia de investigación en la Universidad del Magdalena, al Biólogo Isaac Romero y al Ingeniero Ambiental y Sanitario Luis Naranjo, por su apoyo dentro del Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad del Magdalena; igualmente al Grupo de Investigación de Residuos Peligrosos y Sólidos Urbanos (GIRPSU), al Ingeniero Jorge Arias funcionario del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por permitir la utilización de una de sus estaciones de monitoreo, ubicada en La Granja de la Universidad del Magdalena, para que los reactores estuviesen ubicados dentro de ella mediante el transcurso de la parte experimental y por facilitar los datos de radiación solar en el periodo de tiempo que duró la investigación.

Bibliografía

1. WOOD, Dark y NISCHAL, Maniar. Calentamiento Global. [online]. España: Calentamiento Global, 2010. [Citado 23/Marzo/2010]. Disponible en: <http://calentamientogloballclima.org/>.
2. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD -OMS. El uso de aguas residuales. [online]. Suiza: OMS, 2010. [Citado 01/Abril/2010].

- Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/es/.
- LOPEZ, Andrea; *et al.* Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos. Bogotá D.C (Colombia): Editorial Panamericana Formas e Impresos; 2005. 120 p.
 - CASTRO, Brenda; HUETIO, Viviana y MERA, Adriana. Fotocatálisis Heterogénea con TiO_2 y H_2O_2 para el tratamiento de desechos líquidos con presencia de Fenolftaleína generados en los laboratorios de análisis químico de la Universidad del Cauca. En: Producción Más Limpia. 2008. Vol. 3, p. 36 – 49.
 - MIRA, Juan Camilo. El agua en Colombia. [online]. Colombia: ECOPORTAL, 2006. [Citado 20/Marzo/2010]. Disponible en: <http://www.ecoportal.net/content/view/full/64694>.
 - RAMÍREZ CAMPEROS, Esperanza; *et al.* Aporte de diferentes mecanismos en la remoción de sustancias orgánicas tóxicas presentes en aguas residuales industriales. [online]. Brasil: ABES, 2000. [Citado 26/Marzo/2010]. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/info/remociontoxicos.pdf>.
 - MANGA, J.; LOGREIRA, Nury y SERRALT, J. Reuso de aguas residuales: Un recurso hídrico. [online]. Colombia: UNINORTE, 2001. [Citado 14/Marzo/2010]. Disponible en: http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/9/reuso_de_aguas_residuales.pdf.
 - GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. Fotocatálisis y electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales: Investigaciones y aplicaciones. Medellín (Colombia): Editorial Artes y Letras Ltda., 2007. 174 p.
 - RAJESHWAR, Krishnan; *et al.* Titania-based heterogeneous photocatalysis. Materials, mechanistic issues, and implications for environmental remediation. [online]. Estados Unidos: UTA, 2001. [Citado 05/Marzo/2010]. Disponible en: <http://www.uta.edu/cos/raj/pub/PureAppl.Chem..pdf>.
 - BENCH-COLOMBIA. Fotocatálisis Heterogénea. [online]. Colombia: BENCH-COLOMBIA, 2009. [Citado 20/Marzo/2010]. Disponible en: <http://bdigital.eafit.edu.co/bdigital/PROYECTO/P660.2995V732/capitulo5.pdf>.
 - GIL PAVAS, Edison. Fotocatálisis: una alternativa viable para la eliminación de compuestos orgánicos. En: Universidad EAFIT. 2002. Vol. 127, p. 59 – 64.
 - ALIM SADIK, Wagih Abdel. *et al.* Photodecolourization of ponceau 4R by heterogeneous photocatalysis. En: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2007. Vol. 189, p. 135–140.
 - FUJISHIMA, Akira; RAO, Tata y TRYK, Donald. Titanium dioxide photocatalysis. En: Journal of Photochemistry and Photobiology C: 1Photochemistry. 2006. Vol. 120, p. 1 – 21.
 - MALATO, Sixto; *et al.* Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. En: Catalysis Today. 2009. Vol.147, p. 1-59.
 - UNAL. Aplicaciones químicas de la radiación solar. [online]. Colombia: UNAL, 2005. [Citado 07/Marzo/2010]. Disponible en: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/arauca/87061/figuras/Figura%2066.GIF>.
 - MERA, Adriana. Fotocatálisis heterogénea útil en el tratamiento de residuos líquidos generados en laboratorios de análisis químico y ambiental. [online]. Colombia: UNINORTE, 2005. [Citado 10/Marzo/2010]. Disponible en: <http://www.uninorte.edu.co/divisiones/Ingenierias/IDS/upload/File/Memorias%20II-SIIR/3c-MERA-Colombia-001.pdf>.
 - MENDOZA NUÑEZ, Victor Manuel; *et al.* Total antioxidant levels, gender, and age as risk factors for DNA damage in lymphocytes of the elderly. En: Mechanisms of Ageing and Development. 2001. Vol.122. p. 835-847.
 - BRELAND, Jabe y BYRNE, Robert. Spectrophotometric procedures for determination of sea water alkalinity using bromocresol green. En: Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1993. Vol. 40, p. 629-641.
 - RASANAYAGAM, L. J.; *et al.* Measurement of urine albumin using bromocresol green. En: Clínica Chimica Acta. 1973. Vol. 44, no 1, p. 53 – 57.
 - LEE, Rodkey. Binding of bromocresol green by human serum albumin. En: Archives of Biochemistry and Biophysics. 1964. Vol. 108, p. 510-513.
 - ABSOLUTEASTRONOMY. Bromocresol green. [online]. Estados Unidos: AbsoluteAstronomy, 2008. [Citado 15/Marzo/2010]. Disponible en: http://image.absoluteastronomy.com/images/topicimages/b/br/bromocresol_green.gif.
 - APHA, AWWA y WPCF. Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. 16 ed. Washington (Estados Unidos): APHA, 1985. 1500 p.
 - MARÍN, Bienvenido. Manual de química del agua teoría y práctica. Santa Marta (Colombia): Editorial UNIMAGDALENA, 2009. 220 p.

24. HERRMANN, Jean-Marie. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. En: *Catalysis Today*. 1999. Vol. 53, no 1, p. 115 –129.
25. MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. México D.F: Editorial: Limusa, 2004. 686 p.
26. ALCALDÍA DE SANTA MARTA – MAGDALENA. Santa Marta. [online]. Colombia: Alcaldía de Santa Marta, 2009. [Citado 09/Mayo/2010]. Disponible en: <http://www.santamarta-magdalena.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=M1-1--&m=f&s=m#geografia>.
27. PIDWIRNY, Michael. Solar radiation. [online]. Estados Unidos: The encyclopedia of earth, 2010. [Citado 06/Marzo/2010]. Disponible en: http://www.eoearth.org/article/Solar_radiation.
28. SIMAT. Radiación Solar Ultravioleta. [online]. Mexico: 2005. [Citado 21/Marzo/2010]. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnradiacionn.htm>.
29. GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando.; Op. Cit. p. 174
30. HINCAPIÉ PÉREZ, Margarita; *et al.* La Fotocatálisis en el tratamiento de aguas contaminadas. En: *Revista Ingenierías – Universidad de Medellín*. 2004. Vol. 1, p. 86 – 88.
31. MERA, Adriana.; Op cit.