

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS RESIDUOS DE LOS COLORANTES OBTENIDOS DE LA PRÁCTICA DE QUÍMICA ORGÁNICA II DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, POR EL MÉTODO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂) EN REACTOR HELIOFOTOCATÁLICO.

Beatriz E Osorio Jaramillo Stefani Pinzón Ángel

Grupo de Investigación en Fotocatálisis y Estado Sólido / Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira,
Colombia.

beosorio@utp.edu.co / mzpinzon@utp.edu.co

RESUMEN: La presente investigación tuvo como objetivo la degradación de los colorantes azul de metileno, rojo congo y naranja de metilo, los cuales se obtuvieron de los desechos producidos del Laboratorio de Química II de la práctica de colorantes de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Estos residuos fueron tratados a diferentes concentraciones de TiO₂ (500-700-1000 ppm), pH (3-4-5) y peróxido de hidrógeno (300 ppm). Los ensayos se realizaron en un reactor tipo batch con 1 lámpara de luz UV de 15 W, después de realizar la interpretación de los datos por medio de un análisis multifactorial ANOVA para determinar las mejores condiciones de degradación. Los resultados de las degradaciones fueron azul de metilo (86,16%) a 700 ppm de TiO₂, 300 ppm H₂O₂ y pH 3, rojo congo (87,2%) a 700 ppm TiO₂, 300 ppm H₂O₂ y pH 3 y naranja de metilo (53,39%) 700 ppm TiO₂, 300 ppm H₂O₂ y pH 3. Finalizados estos ensayos se pasó al reactor helio fotocatalítico con luz solar en el cual se realizaron nuevamente las degradaciones para las condiciones mencionadas anteriormente.

El tiempo que duró cada degradación en el reactor helio fotocatalítico con luz solar fue: azul de metileno 1 hora, rojo congo y naranja de metilo 2 horas. Las diluciones fueron azul de metileno 16 mL/L, rojo congo 3 mL/L, naranja de metilo 1 mL/ L y los porcentajes de degradación fueron 91.9%, 85.7%, y 64.9% respectivamente.

Palabras clave: Degradación, dióxido de titanio, fotocatálisis, pH.

RESUME

The present research had as objective the degradation of three colorants (Methylene Blue, Congo Red, Methyl Red), which were obtained from the waste produced by the Organic Chemistry II Laboratory of the Universidad Tecnológica de Pereira.

These wastes were treated at three different concentrations of TiO₂ (500-700-1000 ppm), pH (3-4-5) and hydrogen peroxide (300 ppm). The assays were done in a batch reactor using one UV light lamp of 15 W, after analyzing the data through a multifactorial analysis ANOVA to determine the best degradation conditions. The degradation results were: Methylene Blue (86,16%) at 700 ppm of TiO₂, 300 ppm H₂O₂ and pH 3. Congo Red (87,2%) at 700 ppm of TiO₂, 300 ppm H₂O₂ and pH 3. Methyl Red (53,39%) 700 ppm of TiO₂, 300 ppm H₂O₂ and pH 3. Having done these assays, the samples were treated in a helium photocatalytic reactor using solar light to determine once again the degradations for the conditions mentioned before.

The degradation time in the helium photocatalytic reactor with solar light was: Methylene Blue one hour, Congo Red and Methyl Red two hours. The dilutions were: Methylene Blue 16 mL/L, Congo Red 3 mL/L and Methyl Red 1 mL/L and the degradation percentages were: 91.9%, 85.7%, y 64.9% respectively.

Key words: degradation, titanium dioxide, photocatalysis, pH.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación ejercida por los colorantes industriales ha sido tratada utilizando varias tecnologías de tratamiento como: nano-filtración, micro-filtración, electrocoagulación y las técnicas avanzadas de oxidación como la fotocatalisis tanto heterogénea como homogénea. La fotocatalisis heterogénea, a diferencia de la mayoría de los procesos fotoquímicos, no es selectiva y puede emplearse para tratar mezclas complejas de contaminantes. Por otro lado, la posibilidad de la utilización de la radiación solar como fuente primaria de energía, le otorga un importante y significativo valor medioambiental; el proceso, constituye un claro ejemplo de tecnología sostenible. [1-2]

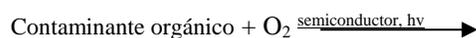
La fotocatalisis implica la combinación de fotoquímica y catálisis. Ambos, luz y catalizador, son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química. Así, la fotocatalisis puede ser definida como la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador. En el caso de la fotocatalisis heterogénea, se emplean semiconductores (sólidos en suspensión acuosa o gaseosa). Existen múltiples de estos foto sensibilizadores tales como: Al_2O_3 , ZnO , Fe_2O_3 y TiO_2 . Sin embargo, el más usado en aplicaciones foto-catalíticas es el dióxido de titanio.

Los procesos de oxidación permiten destruir una gran variedad de compuestos tóxicos que son persistentes a la degradación natural. Estos se han-

venido desarrollando desde la década de los ochenta y han probado ser efectivos en la destrucción de muchos contaminantes orgánicos. [3]

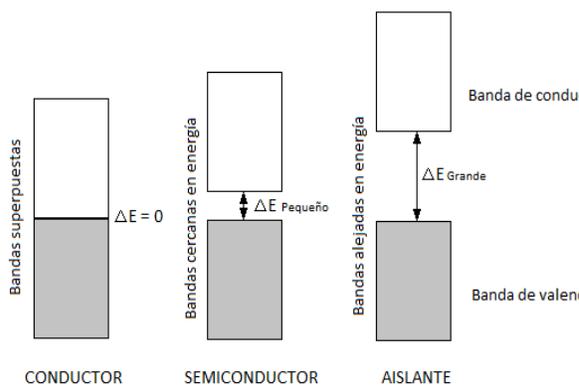
Los residuos que se obtienen de la práctica de laboratorio de colorantes de la asignatura Química Orgánica II, no se degradan fácilmente, siendo los contaminantes de mayor impacto en el medio ambiente, especialmente en las aguas residuales, ya que al ser vertidos pueden presentar una alta contaminación debido a su toxicidad. Por lo tanto, deben ser tratados empleando métodos adecuados, entre los que se encontró bibliográficamente que la fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO_2) es uno de los más eficientes. [4-6]

El término fotocatalisis se introdujo en el glosario de la ciencia a principios de 1930. Cuando se habla de fotocatalisis se hace referencia a una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato. Una de las aplicaciones de la fotocatalisis, se encuentra en la resolución de problemas de interés ambiental, como puede ser la depuración de agua o aire, utilizando un semiconductor sensible a la luz como catalizador. En este caso, se habla de fotocatalisis heterogénea porque las foto reacciones transcurren en la superficie del catalizador (en la interface líquido-sólido o gas-sólido, respectivamente). La fotocatalisis heterogénea permite la degradación, e incluso la mineralización, de gran variedad de compuestos orgánicos según la reacción global siguiente:



CO₂ + H₂O + Ácidos minerales

La etapa inicial del proceso consiste en la generación de un par electrón-hueco en las partículas del semiconductor. Cuando un fotón con energía $h\nu$, que iguala o supera la energía del salto de banda del semiconductor, E_g , incide sobre éste, se promueve un electrón, e^- , de la banda de valencia hacia la banda de conducción, generándose un hueco, h^+ , en la banda de valencia. La energía de banda prohibida se define como la diferencia energética de la banda de valencia y la banda de conducción de un foto-catalizador.



Los electrones que llegan a la banda de conducción pueden desplazarse dentro de la red del semiconductor. Asimismo, también pueden desplazarse los lugares vacíos (los huecos) que han dejado en la banda de valencia.[7]

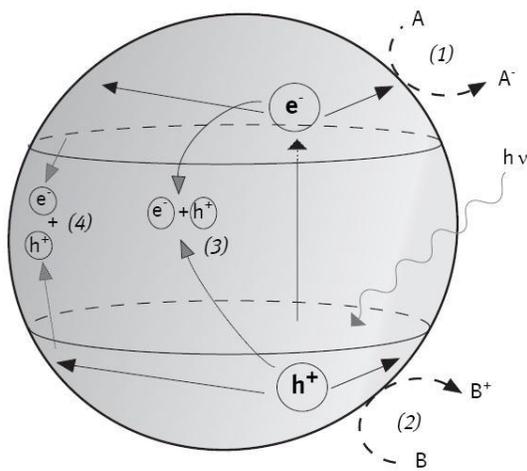


Figura 1: Proceso foto-catalítico en una partícula de semiconductor.

Tal como se muestra en la figura 1, los electrones y los huecos foto-generados pueden seguir diferentes caminos. Por un lado, ambas especies pueden migrar a la superficie del semiconductor e involucrarse en una transferencia electrónica con especies absorbidas en la superficie de la partícula, ya sean especies orgánicas, inorgánicas o el mismo disolvente. Los electrones reducen a un aceptor de electrones, adsorbido en la superficie del semiconductor (normalmente oxígeno en una solución aireada). Al mismo tiempo, los huecos pueden aceptar un electrón de una especie donadora de electrones, de manera que esta especie se oxida.

Por tanto, la captura de un electrón por parte de una especie aceptora genera un anión radical, mientras que la captura de un hueco por parte de una especie aceptora genera un catión radical. Estos iones radicales son muy reactivos y pueden reaccionar entre ellos o con otras especies, e incluso pueden difundirse desde la superficie del semiconductor hacia el seno de la solución y participar en una reacción química en el seno del disolvente.

Por otro lado, en competencia con el proceso de transferencia electrónica interfacial se encuentra el de recombinación electrón-hueco. La recombinación puede ocurrir tanto en el interior de la partícula de semiconductor como en la superficie, y va acompañada de la liberación de calor. Debe señalarse que la recombinación es perjudicial para la eficiencia del proceso de fotocatalisis, dado que reduce el número de electrones y huecos que pueden ser transferidos a las especies absorbidas en la superficie del semiconductor.[8]

La fotocatalisis se aplica principalmente a la oxidación de compuestos orgánicos y a la reducción de compuestos inorgánicos y, actualmente, también se aplica a la síntesis orgánica, la cual a veces incluye la reducción de compuestos orgánicos.

Las reacciones redox del proceso foto catalítico tienen aplicaciones muy versátiles, especialmente en el tratamiento de aguas residuales. Por otra parte, también se reportó que el proceso foto-catalítico es capaz de matar microorganismos

y que, además, no produce compuestos trihalogenados cuando se aplica al tratamiento de aguas residuales.[9-11]

2. METODOLOGIA

2.1 Muestra de análisis: En el proceso para determinar la longitud de onda de los colorantes con el método de análisis instrumental espectrofotométrico de radiación UV, se realizó el siguiente procedimiento.

- Se preparó una solución de cada uno de los colorantes de concentración desconocida (azul de metileno, naranja de metilo y rojo congo).
- Se realizó un barrido espectral en el espectrofotómetro UV, para determinar el pico máximo de absorción de cada uno de los colorantes.
- Se prepararon patrones de concentración desconocida de cada uno de los colorantes. Estas soluciones se prepararon con diferentes cantidades y se determinó que los volúmenes a utilizar serían 1 mL para el rojo congo, 0.5 mL para el naranja de metilo y 8 mL para el azul de metileno ya que se trabajó con residuos del Laboratorio de Química II.

2.2 Variables: Para determinar las variables del proceso de degradación se tuvo en cuenta el análisis previo de la bibliografía referente al método de fotocatalisis heterogénea. TiO₂ anatasa se manejaron concentraciones de 500, 700 y 1000 ppm. Las variaciones de pH fueron 3, 4 y 5.

2.3 Procedimiento

Las condiciones experimentales empleadas para cada ensayo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Ensayos realizados a las muestras por triplicado.

MUESTRA	TiO ₂ (ppm)	H ₂ O ₂ (ppm)	pH
Azul de metileno	500	300	3
	700	300	4
	1000	300	5
Rojo congo	500	300	3
	700	300	4
	1000	300	5
Naranja de metilo	500	300	3
	700	300	4
	1000	300	5

El volumen tomado de cada colorante (azul de metileno, rojo congo y naranja de metilo) fueron 8 mL, 1 mL y 0.5 mL respectivamente, cada uno de estos volúmenes se diluyeron en un litro de agua destilada y posteriormente se tomó de cada solución 200 mL, los cuales se adicionaron a un beaker de 300 mL. Después se midió el pH y se ajustó con H₂SO₄ hasta obtener los valores requeridos (3, 4 y 5); se pesaron las cantidades correspondientes a 500, 700 y 1000 ppm de TiO₂; esta solución preparada se llevó al reactor tipo Batch, con agitación constante para propiciar la adsorción y homogenización del TiO₂ y sin hacer incidir la radiación UV se dejó durante 25 minutos. Pasado este tiempo se agregaron 300 ppm de H₂O₂ y se agitó nuevamente por 5 minutos. Después de este proceso se encendió la lámpara de radiación UV y en el caso del azul de metileno se tomó una muestra cada 10 minutos durante 2 horas. Para el rojo congo y el naranja de metilo se hizo cada 20 minutos durante 3 horas.

Las alícuotas tomadas en cada proceso de degradación fueron de 2 mL, recolectadas con una jeringa genérica y un filtro para jeringa Fisher Brand de membrana 0.22 µm.

Posteriormente se realizó el análisis de varianza ANOVA multifactorial usando el software statgraphics centurión XVI para determinar las mejores condiciones de degradación de cada colorante y con estos resultados se pasa al reactor helio fotocatalítico, en el cual se hace el montaje para cada colorante

2.4 Equipos

Balanza Analítica PRECISA (+/- 0.005). Equipo para medir la cantidad de dióxido de titanio.



Espectrofotómetro de UV GENESYS 20. Equipo utilizado para la cuantificación de azul de metileno, naranja de metilo y rojo congo, por la medida de absorbancia.



Espectrofotómetro de UV-VISIBLE: Utilizado para hacer el barrido espectral.



Filtro para jeringa Fisherbrand de poro 0.22µm. Utilizado para separar los residuos de TiO₂ contenidos en las alícuotas de cada muestra de análisis.



pHmetro Fischer accument AB15. Equipo utilizado para la medición y ajuste del pH.



Reactor Artesanal tipo batch solar. Equipo utilizado para realizar la reacción fotocatalítica. Contiene lámparas de radiación UV cercano y agitadores magnéticos incorporados.



Cristalizador: Utilizado para la degradación de los contaminantes en el reactor helio fotocatalítico.



Montaje para reactor helio fotocatalítico: Este equipo se utilizó para realizar las degradaciones solares.



3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

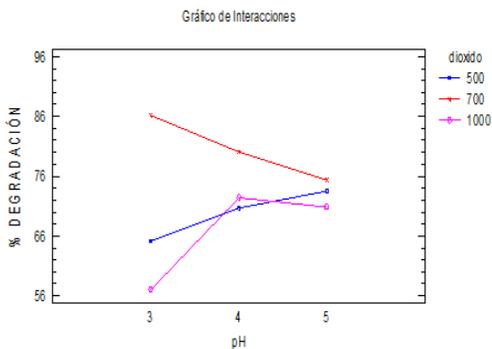
Inicialmente se realizó un barrido espectral de cada uno de los residuos para determinar la longitud de onda en la cual los contaminantes absorbían la radiación. Las longitudes de onda seleccionadas fueron: azul de metileno 663 nm, naranja de metilo 487 nm y rojo congo 487 nm.

Se realizó la degradación de los tres colorantes por el método de fotocatalisis heterogénea mediada con dióxido de titanio (TiO_2). Los resultados obtenidos de cada degradación se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Porcentaje de degradación para cada ensayo.

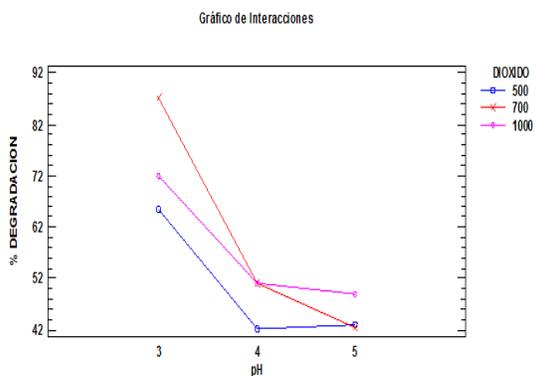
COLORANTE	MUESTRA	H_2O_2	TiO_2	pH	% DEGRADACIÓN
Azul de metileno	1	300	500	3	65.06
	2	300	500	4	70.7
	3	300	500	5	73.46
	4	300	700	3	86.16
	5	300	700	4	80.06
	6	300	700	5	75.45
	7	300	1000	3	57
	8	300	1000	4	72.43
	9	300	1000	5	70.73
Rojo congo	10	300	500	3	65.4
	11	300	500	4	42.23
	12	300	500	5	42.86
	13	300	700	3	87.2
	14	300	700	4	50.96
	15	300	700	5	42.53
	16	300	1000	3	72.06
	17	300	1000	4	51.07
	18	300	1000	5	49.01
Naranja de metilo	19	300	500	3	43.85
	20	300	500	4	26.95
	21	300	500	5	13.52
	22	300	700	3	53.39
	23	300	700	4	19.19
	24	300	700	5	11.27
	25	300	1000	3	43.17
	26	300	1000	4	16.6
	27	300	1000	5	3.7

Los datos de la tabla 2 fueron objeto de un análisis de varianza ANOVA multifactorial usando el software statgraphics centurión XVI para relacionar las condiciones con los porcentajes de degradación. Las figuras 1, 2 y 3 muestran la interacción entre los parámetros estudiados (H_2O_2 , TiO_2 y pH).



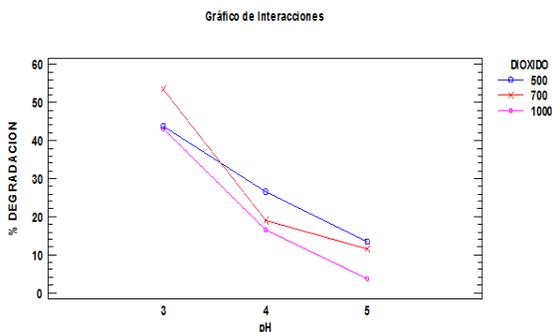
GRÁFICA 1: Interacción Dióxido de titanio-pH Azul de Metileno.

Se puede observar para la interacción que a un pH 3 y 700 ppm de Dióxido la degradación presenta un 86,2 %.



GRÁFICA 2: Interacción Dióxido de titanio-pH. Rojo Congo.

En esta interacción es notable la diferencia que presentan los porcentajes de degradación siendo el más eficiente el pH 3 a 700 ppm con un porcentaje de degradación de 87,2%.



GRAFICA 3: Interacción % de degradación-pH, Naranja de Metilo.

Se puede observar para esta interacción que la degradación más eficiente se encuentra a un pH 3 y a una concentración de Dióxido de 700 ppm dando un porcentaje de degradación de 53,4%.

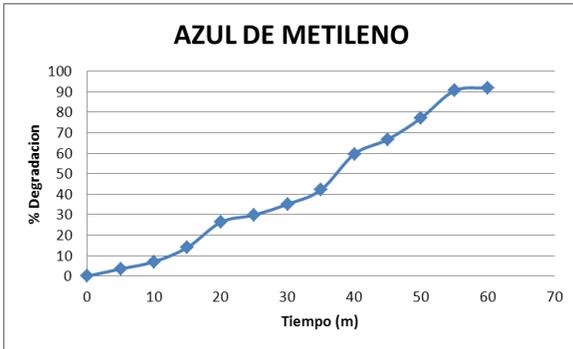
Al finalizar las pruebas en el laboratorio con el reactor artesanal Bach y teniendo las condiciones a las cuales se presentó la mejor degradación de cada uno de los contaminantes (700 ppm de TiO_2 , pH 3 y 300 ppm H_2O_2), se procedió a realizar los ensayos con radiación solar.

Al iniciar las degradaciones con radiación solar, se observó que ocurrían en un tiempo muy corto, por lo tanto se optó por aumentar las concentraciones de los colorantes. Las nuevas diluciones que se utilizaron para la degradación solar fueron: azul de metileno 16 mL/L, rojo congo 3 mL/L y naranja de metilo 1 mL/L.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3, 4 y 5.

TABLA 3: Datos obtenidos de la degradación helio fotocatalítica del azul de metileno.

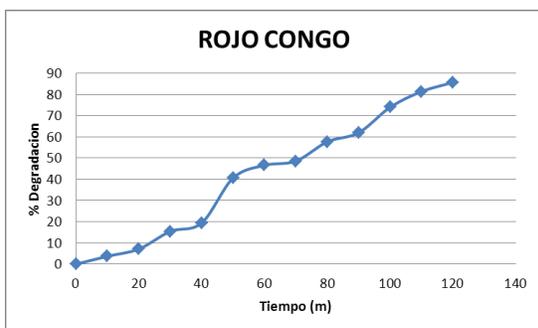
Muestra	Absorbancia	Tiempo	% de degradación
1	0.285	0	0
2	0.275	5	3,5
3	0.265	10	7
4	0.245	15	14
5	0.210	20	26,3
6	0.200	25	29,8
7	0.185	30	35,1
8	0.165	35	42,1
9	0.115	40	59,6
10	0.095	45	66,7
11	0.065	50	77,2
12	0.027	55	90,5
13	0.023	60	91,9



GRÁFICA 4: Curva de degradación con radiación solar del azul de metileno.

TABLA 4: Datos obtenidos de la degradación helio fotocatalítica del rojo congo.

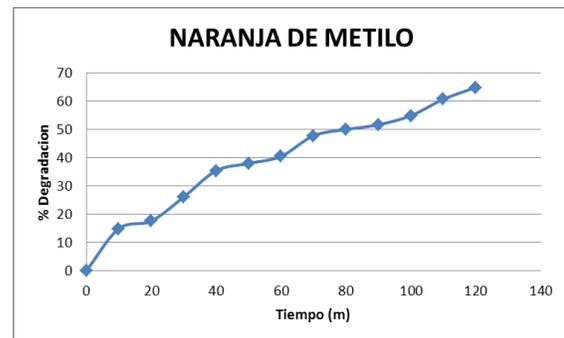
Muestra	Absorbancia	Tiempo	% de degradación
1	0,350	0	0
2	0,337	10	3,7
3	0,325	20	7,1
4	0,296	30	15,4
5	0,282	40	19,4
6	0,208	50	40,6
7	0,187	60	46,6
8	0,180	70	48,6
9	0,148	80	57,7
10	0,133	90	62
11	0,091	100	74
12	0,065	110	81,4
13	0,050	120	85,7



GRÁFICA 5: Curva de degradación con radiación solar del rojo congo.

TABLA 5: Datos obtenidos de la degradación helio fotocatalítica del naranja de metilo.

Muestra	Absorbancia	Tiempo	% de degradación
1	0,410	0	0
2	0,349	10	14,9
3	0,338	20	17,6
4	0,303	30	26,1
5	0,265	40	35,4
6	0,254	50	38
7	0,244	60	40,5
8	0,214	70	47,8
9	0,205	80	50
10	0,198	90	51,7
11	0,185	100	54,9
12	0,161	110	60,7
13	0,144	120	64,9



GRÁFICA 6: Curva de degradación en el reactor helio fotocatalítico del naranja de metilo.

TABLA 5: Comparación de los resultados obtenidos en el reactor artesanal batch y en reactor helio fotocatalítico.

Contaminante	Reactor artesanal batch	Reactor helio fotocatalítico
	% Degradación	% Degradación
Azul de metileno	86,2	91,9
Rojo congo	87,2	85,7
Naranja de metilo	53,4	64,9

Con los datos de la tabla 5 se puede observar que el proceso de degradación en el reactor helio fotocatalítico es más eficiente, aunque la diferencia no es muy significativa, se debe tener en cuenta que las diluciones utilizadas en estos ensayos fueron el doble de las degradaciones del laboratorio y en el caso del rojo congo se puede ver que la degradación con mayor porcentaje fue la realizada en el reactor artesanal debido a que se utilizó el triple de la dilución inicial.

4. CONCLUSIONES

- La concentración óptima a la cual se lleva a cabo la degradación de los contaminantes es 700 ppm del catalizador dióxido de titanio.
 - El pH ideal para favorecer las degradaciones fue 3 y se pudo evidenciar que este parámetro influye directamente en la eficiencia de cada degradación.
 - La degradación de los colorantes azul de metileno, rojo congo y naranja de metilo se puede llevar a cabo mediante el método de fotocatalisis heterogénea mediada con dióxido de titanio.
 - Por medio del análisis multivariado ANOVA se determinaron las condiciones a las cuales la fotocatalisis presento un porcentaje de degradación más eficiente las cuales fueron 700 ppm del catalizador dióxido de titanio, pH 3 y 300 ppm de H₂O₂.
 - Se determinó que el porcentaje de degradación de los contaminantes en el reactor helio fotocatalítico fue más productiva que en el reactor artesanal, ya que en el primero se hicieron los ensayos utilizando el doble de la concentración de los colorantes azul de metileno y rojo congo, y en el caso del naranja de metilo se triplico su concentración.
- Con esta investigación se puede concluir que los procesos de oxidación avanzados son métodos ideales para la degradación de residuos de colorantes que ocasionan contaminación ambiental causando un impacto negativo.

5. RECOMENDACIÓN

- Se recomienda utilizar el método de fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio no solo por los buenos resultados obtenidos en este trabajo si no por ser un método amigable con el medio ambiente y auto sostenible, ya que utiliza la energía solar como fuente de radiación y el catalizador utilizado se puede recuperar y reutilizar.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Posada Parra Martha L. y Pulido Cano Jennifer A., Evaluación de la degradación de un colorante directo utilizado en la industria textil utilizando la tecnología de oxidación fotocatalítica heterogénea, Bogotá D.C, 2011, 117 h, trabajo de grado (Ingeniera industrial) Universidad de la Salle, Facultad de ingeniería, Programa de ingeniería ambiental y sanitaria.

[2] Garcés Giraldo Luis F., Hernández Ángel Marta L., Peñuela Mesa Gustavo A., Restrepo Alejandra R. y Salazar Palacio Julián A., Degradación de aguas residuales de la industria textil, Medellín, 2005, Artículo Vol. 2, Revista lasallista de investigación, Corporación Universitaria Lasallista, Línea de investigación: Tratamiento de Aguas, Grupo de Investigación Aplicada en Medio Ambiente GAMA y Semillero de investigación en Gestión y Medio Ambiente SIGMA.

[3] Garcés Giraldo Luis Fernando, Mejía Franco Edwin Alejandro y Santamaría Arango Jorge Julián, La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, Medellín, Artículo, Revista lasallista, Línea de investigación: Tratamiento de Aguas. Semillero de investigación en Gestión y Medio Ambiente SIGMA.

[4] Carvajal Gómez Ángela María y Jiménez Coqueco Leidy Johana, Evaluación de la degradación por fotocatalisis heterogénea en un reactor artesanal y heliofotocatalítico del ácido 3,5-Dinitrosalicílico (DNS), Pereira, 2012, 65h, trabajo de grado (Química industrial), Universidad Tecnológica de Pereira, facultad de tecnologías, programa Química industrial.

[5] Blanco Gálvez Julián, Malato Rodríguez Sixto, Estrada Gasca Claudio A, Bandala Silva Erick R, Gelover Silvia y Leal Teresa, Purificación de Aguas por Fotocatalisis Heterogénea: Estado del Arte. Archivo disponible en www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/08cap03.pdf

[6] Restrepo Inés, Sánchez Luis Darío, Galvis Alberto, Rojas Jhonny y Sanabria Irma Janeht, Avances en Investigación y Desarrollo en Agua y Saneamiento para el Cumplimiento de las Metas del Milenio, Cali, 2007, Universidad del Valle.

[7] Pulido Melian Elisenda, Estudio de la degradación de m-cresol, ácido ftálico y 2,4-diclorofenol mediante fotocatalisis heterogénea. Síntesis y caracterización de fotocatalizadores basados en TiO_2 , Las Palmas, 2010, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Departamento ingeniería de procesos, Programa de doctorado ingeniería ambiental y desalinización.

[8] Monllor Satoca Damián, Fotoelectroquímica de electrodos semiconductores nanocristalinos: procesos de transferencia de cargas y estrategias de mejora de la fotoactividad, Alicante, 2010, 291 h, trabajo de grado (Doctor en Química), Universidad de Alicante, Departamento de Química Física.

[9] Castañeda Jiménez Amparo Carolina, Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo, Bogotá, 2014, 41 h, trabajo de grado (Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente), Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Especialización de recursos hidráulicos y medio ambiente.

[10] López Montoya Nathalia, Ruiz Patiño Wlner Ferney, Degradación heliofotocatalítica del contaminante azul de metileno, verde de malaquita y rodamina b de titanio dopado con cromo, Pereira, 2015, trabajo de grado (Químico Industrial), Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Química.

[11] Reinoso Osorio Paola Andrea, Degradación de resorcinol por fotocatalisis heterogénea mediada por TiO_2 y H_2O_2 , Pereira, 2009, trabajo de grado (Tecnóloga Química), Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Química.

