



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE COLORANTE SINTÉTICO
EMPLEADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Autor

Daniel David Donoso Morillo

Año
2017



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA DE COLORANTE SINTÉTICO
EMPLEADO EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesor Guía

PhD. Francisco Javier Domínguez Rodríguez

Autor

Daniel David Donoso Morillo

Año

2017

DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Francisco Javier Domínguez Rodríguez
Doctor en Ingeniería Química: Mención Superficies y Catálisis
CI: 1757153737

DECLARACIÓN PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Daniel Hernán Hidalgo Villalba

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Especialización Ingeniería ambiental

CI: 1801914449

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Daniel David Donoso Morillo

CI: 1718566308

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la fortaleza para culminar mi carrera universitaria. A mis abuelitos, tías y primos por acompañarme durante esta etapa. A mis amigos, que compartieron conmigo esta experiencia, gracias por permitirme ser parte de sus vidas. A cada uno de mis profesores que me inculcaron los conocimientos para poder convertirme en un profesional capacitado. Y un agradecimiento especial a Nataly, quien estuvo conmigo desde que esta etapa comenzó, gracias por incentivarme día a día para poder culminar mis estudios universitarios.

DEDICATORIA

A mi padre Víctor, por apoyarme siempre en mis decisiones y por inculcar los valores que hoy en día han sabido formarme como persona. A mi hermana Doménica, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, espero ser un buen ejemplo del cual puedas guiarte. Y especialmente a mi madre Rocío, por estar conmigo cada día durante estos años, apoyándome, guiándome y sobre todo dándome el afecto necesario por el cual puedo decir que he tenido las fuerzas necesarias para no rendirme.

RESUMEN

Uno de los principales aportes económicos para el Ecuador proviene de la industria textil, misma que ha venido desarrollando importancia para el país desde varios años atrás. Esta industria, además, se ha caracterizado por la contaminación que genera en cada una de sus operaciones, siendo la tintura un proceso donde ocurren varios problemas que atentan contra la seguridad del medio ambiente. Entre los principales problemas encontramos: la generación de aguas residuales a gran escala que terminan perjudicando ecosistemas por su carga de contaminantes químicos, el gasto excesivo del recurso agua debido a las cantidades inmensurables que se usan en este proceso y la generación de contaminación visual cuando aguas contaminadas de colorante, provenientes de procesos de tintura, son vertidas a ríos o cuerpos de agua cercanos a poblaciones o comunidades. El presente estudio buscó tratar los problemas de contaminación química y visual generados por las aguas residuales del proceso de tintura. Para esto se utilizaron aguas contaminadas con colorante sintético, cuya concentración del mismo varió entre 10 a 30 mg/L, con el fin de tratarlas por fotocátalisis a nivel de laboratorio, para así degradar el colorante rojo drimarén cl-5b empleado para el estudio. Además, se utilizó como fotocatalizador el TiO_2 en varias concentraciones y se utilizó radiación ultravioleta proveniente de dos fuentes, una de la luz solar y otra de una fuente artificial (cámara UV), con diferentes tiempos de exposición. Al final de la investigación se logró degradar el 96% del colorante cuando se empleó 2 g/L de dióxido de titanio, en un tiempo de exposición a la cámara UV de 6 horas, para las diferentes concentraciones de colorante empleadas.

Palabras claves: Degradación fotocatalítica, agua residual textil, rojo drimarén cl-5b, luz UV, espectrofotometría.

ABSTRACT

One of the main economic contributions of Ecuador comes from the textile industry, which has been developing importance for the country in recent years. This industry has also been characterized by the pollution it generates in each of its operations, the dye being a process where several problems occur that threaten the safety of the environment. Among the main problems are: the generation of large-scale wastewater that end up damaging ecosystems due to their chemical pollutants, the excessive waste of water due to the immeasurable quantities used in this process and the generation of visual pollution when water contaminated with dye, from dyeing processes, are discharged to rivers or bodies of water close to populations or communities. This present study sought to address the problems of chemical and visual pollution generated by the waste water from the dyeing process. For this, water contaminated with synthetic dye, with concentrations varying between 10 to 30 mg / L, was created to treat them by photocatalysis at the laboratory scale, with the purpose of degrading the red dye drimarén cl-5b. In addition, TiO₂ was used as a photocatalyst in various concentration. Ultraviolet radiation from two sources, one from sunlight and the other from an artificial source (UV chamber), with different exposure times were controlled as well. At the end of the investigation, 96% of the dye was degraded when 2 g / L of titanium dioxide was used, at a UV exposure time of 6 hours, for the different concentrations of dye used.

Keywords: Photocatalytic degradation, textile residual water, red drimarén cl-5b, UV light, spectrophotometry.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Marco referencial.....	2
1.3. Objetivo general.....	3
1.4. Objetivos específicos.....	3
1.5. Alcance	3
1.6. Justificación	4
2. Marco Teórico.....	4
2.1. Componentes químicos del sistema de fotocátalisis	4
2.2. Parámetros fisicoquímicos de calidad de agua.....	5
2.3. Tipos de contaminación.....	6
2.4. Método de análisis (Espectrofotometría)	6
2.5. Tipos de tratamientos de aguas por oxidación avanzada ...	7
2.5.1. Fotocatálisis Heterogénea	8
2.5.2. Ozonización catalítica	8
2.5.3. Ozonización fotocatalítica.....	9
2.6. Resultados de estudios previos basados en fotocátalisis...	9
3. Diseño del plan experimental y Metodología.....	11
3.1. Diseño del plan experimental	11
3.1.1. Medición del porcentaje de degradación del colorante sintético localizado en las aguas residuales.....	12
3.2. Metodología	12

3.2.1. Tipo de tratamiento de agua por oxidación avanzada a emplearse.....	12
3.2.2. Materiales	12
3.2.3. Especificaciones de la cámara de luz ultravioleta.....	13
3.2.4. Preparación de las aguas residuales sintéticas.....	13
3.2.4.1. Concentración de colorante utilizado	13
3.2.4.2. Concentración de catalizador utilizado.....	13
3.2.4.3. Tiempos de exposición a la cámara de luz UV empleados.....	14
3.2.4.4. Tiempos de exposición a la luz UV solar empleados.....	14
3.2.5. Envío de aguas residuales al gestor.....	14
4. Resultados.....	15
4.1. Porcentaje de degradación de colorante en las muestras de agua residual con exposición a la cámara UV	15
4.2. Selección de condiciones con mayor efectividad de degradación de colorante mediante exposición a la cámara UV.....	15
4.3. Porcentaje de degradación de colorante en las muestras de agua residual con exposición a luz solar	17
4.4. Comparación de efectividad entre métodos por captación de radiación UV.....	18
4.5. Discusión y análisis estadístico de los resultados obtenidos.....	19
5. Conclusiones y recomendaciones.....	51
5.1. Conclusiones	51

5.2 Recomendaciones	52
Referencias	54
ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de degradación en muestras expuestas a la cámara UV	16
Tabla 2. Tratamientos con mayor porcentaje de degradación en la cámara UV	17
Tabla 3. Resultados de degradación en muestras expuestas a la radiación solar.....	17
Tabla 4. Radiación solar producida en los días de tratamiento.....	18
Tabla 5. Comparación de resultados de muestras expuestas a la cámara UV y a la luz solar	19
Tabla 6. Análisis de medias de degradación en función a la concentración de colorante con cámara UV.....	23
Tabla 7. Análisis ANOVA en función de la concentración de colorante con cámara UV.....	24
Tabla 8. Análisis de significancias entre las concentraciones de colorante con cámara UV.....	24
Tabla 9. Análisis de medias de degradación en función del tiempo con cámara UV.....	33
Tabla 10. Análisis ANOVA en función del tiempo con cámara UV.....	33
Tabla 11. Análisis de significancias entre los tiempos de exposición con cámara UV.....	34
Tabla 12. Análisis de medias de degradación en función del TiO ₂ con cámara UV.....	43
Tabla 13. Análisis ANOVA en función del TiO ₂ con cámara UV.....	43
Tabla 14. Análisis de significancias entre las concentraciones de TiO ₂ con cámara UV.....	44
Tabla 15. Análisis de medias de degradación en función del tiempo con luz solar.....	46
Tabla 16. Análisis ANOVA en función del tiempo con cámara luz solar.....	47
Tabla 17. Análisis de medias de degradación en función de TiO ₂ con luz solar.....	48
Tabla 18. Análisis ANOVA en función del TiO ₂ con cámara luz solar.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de degradación en función de la concentración de colorante con cámara UV.....	25
Figura 2. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 0 g/L).....	26
Figura 3. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 2 g/L).	26
Figura 4. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 3 g/L).	27
Figura 5. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 4 g/L).	27
Figura 6. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 0 g/L).	28
Figura 7. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 2 g/L).....	28
Figura 8. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 3 g/L).	29
Figura 9. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 4 g/L).	29
Figura 10. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 0 g/L).	30
Figura 11. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 2 g/L).	30
Figura 12. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 3 g/L).	31
Figura 13. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO ₂ 4 g/L).	31
Figura 14. Degradación total de colorante en función al tiempo con cámara UV.	32
Figura 15. Curva de degradación en función al tiempo de exposición con cámara UV.	35

Figura 16. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 3 h).	36
Figura 17. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 6 h).	36
Figura 18. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 9 h).	37
Figura 19. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 3 h).	38
Figura 20. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 6 h).	38
Figura 21. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 9 h).	39
Figura 22. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 3 h).	40
Figura 23. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 6 h).	40
Figura 24. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al TiO ₂ (Tiempo 9 h).	41
Figura 25. Degradación total de colorante en función al tiempo con la cámara UV.	42
Figura 26. Curva de degradación en función al TiO ₂ con cámara UV.	45
Figura 27. Curva de degradación en función al tiempo con luz solar.	47
Figura 28. Curva de degradación en función al tiempo con luz solar.	49
Figura 29. Comparación de resultados de degradación con luz solar y cámara ultravioleta.	50
Figura 30. Mejores porcentajes de degradación para cada concentración de colorante.	50

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La industria textil una de las más importantes en el país, emplea grandes cantidades de agua en cada uno de sus procesos hasta la obtención de cada textil, siendo el proceso de tintura una de las fases en donde más agua se consume. Alrededor de 125 a 170 litros de agua por kilogramo de producto son utilizados en esta etapa del proceso (Morillo, 2012). El agua utilizada en la industria textil ecuatoriana generalmente es obtenida a través de pozos, es decir, la industria se abastece de agua subterránea; generando un agotamiento de esta fuente de agua (PASA, 2016).

Uno de los principales problemas en las aguas residuales de la industria textil es la cantidad de colorante procedente del proceso de teñido, que provoca contaminación química y visual cuando esta es vertida en un afluente (López, Amante y Gutiérrez, 2010). En el proceso de teñido, 2% del colorante utilizado termina directamente en la alcantarilla o efluente, y un 10% del mismo es vertido en forma de agua residual, lo que quiere decir que el 88% del colorante total es aprovechado. (Garzón, Pedroza y Barragán, s.f.).

En Ecuador el 90% de las industrias textiles descargan sus aguas residuales por la red de alcantarillado público, aumentando la contaminación ambiental y el desperdicio de agua (EMAAP-Q, 2009).

El propósito de esta investigación fue reducir la concentración del colorante sintético (azoico) expresado en %m/v, que se encuentra en las aguas residuales provenientes del proceso de tintura en la industria textil, mediante una reacción fotocatalítica, la cual se basó en la exposición del agua residual a rayos UV, los cuales fueron absorbidos por un óxido metálico (dióxido de titanio), que sirvió como fotocatalizador. El dióxido de titanio presenta un comportamiento catalítico que permite una mejor absorción de la luz para que así se efectuó la degradación

del colorante azoico (Corzo y Vega, 2012). Al degradar el colorante, se recirculará el agua tratada al proceso de tintura, para así, reducir la cantidad de agua consumida y por ende la cantidad de agua residual producida.

1.2. Marco referencial

La industria textil genera aguas residuales muy contaminantes respecto a otras industrias, debido a su composición de: colorantes, DBO, DQO, sustancias alcalinas, sólidos suspendidos, sólidos orgánicos y turbidez. Éstos contaminantes representan un problema ambiental para el medio en donde son descargados (Pérez, 2015).

El agua residual del proceso de tintura de la industria textil es una de las más contaminantes, razón por la cual se investigan alternativas más eficientes a los tratamientos convencionales (precipitación, floculación, cloración, adsorción, etc.), entre éstas está la fotocatalisis. Actualmente la fotocatalisis se ha utilizado sólo en plantas piloto, debido a que es una técnica que aún se encuentra en investigación para alcanzar mejores rendimientos de remoción, para así ser escalada industrialmente (Corzo y Vega, 2012).

Los tratamientos fotocatalíticos son considerados una tecnología prometedora que garantiza el tratamiento de aguas residuales, por la reducción de costos que implica el uso de energía solar durante el tratamiento. Con mayores eficiencias, este mecanismo de tratamiento se impondrá sobre otros métodos de oxidación (Garcés, Mejía y Peñuela, 2004).

Para que se dé el proceso de depuración por fotocatalisis es importante emplear un catalizador (óxido metálico) que absorba los rayos solares con el fin de que se produzcan reacciones químicas de óxido-reducción, que faciliten la degradación del colorante (Garcés y Peñuela, 2004).

Es importante lograr la degradación del colorante para que el agua utilizada en el proceso pueda recircularse y disminuya el uso de agua potable en un 70 % aproximadamente. La reducción de consumo de este recurso representará además una disminución en los costos del tratamiento (López, Amante y Gutiérrez, 2010).

1.3. Objetivo general

Degradar el colorante sintético presente en las aguas residuales de la industria textil usando fotocatalisis.

1.4. Objetivos específicos

- Determinar el porcentaje de degradación del colorante sintético mediante espectrofotometría.
- Definir la concentración óptima de catalizador y el tiempo de exposición a la radiación UV necesario, que permitan la máxima remoción de colorante.

1.5. Alcance

El proyecto busca optimizar un conjunto de condiciones experimentales para el tratamiento de aguas que contienen colorantes sintéticos mediante degradación fotocatalítica a nivel de laboratorio, para así formar un sistema que pudiera ser escalado industrialmente con la finalidad de reducir la contaminación de las descargas de aguas residuales textiles y disminuir el consumo de agua potable.

Es así, como el proyecto se realizó aplicando dos fuentes de emisión de radiación ultravioleta: radiación solar y mediante una cámara UV. De esta manera al realizar el escalado industrial se podrá utilizar el proceso sin importar las condiciones climáticas, siendo así la radiación solar la fuente principal de rayos

ultravioleta, y la cámara UV la fuente de reserva cuando las condiciones climáticas no sean las más favorables en donde se encuentre localizada la industria.

1.6. Justificación

El proyecto busca reducir la contaminación por colorantes producida por las aguas residuales de la industria textil en el proceso de teñido. Además, pretende preservar el recurso natural agua, por medio de la recirculación de la misma. Esto, logrará reducir la cantidad de agua residual vertida en los ríos o alcantarillas y por tanto la contaminación. La industria textil como tal también obtendrá un beneficio económico que se dará por el ahorro de agua y la optimización de materia prima que se conseguirá al reutilizar el agua en la fase de tinturado (Morillo, 2012).

2. Marco Teórico

Para entender los procesos de la industria textil se hace necesario conocer una serie de aspectos teóricos y metodológicos que serán detallados a lo largo de este capítulo.

2.1. Componentes químicos del sistema de fotocatalisis

Colorantes Azoicos: Son colorantes de origen sintético utilizados en la industria que se caracterizan por contar en su estructura con un grupo azo ($-N=N-$), en la molécula que se encarga de unir al menos dos anillos aromáticos. Todos los compuestos azo tienen color, pero no todos sirven como colorantes.

Un colorante azoico es preparado con una amina aromática que reacciona con ácido nitroso produciendo un compuesto dinitrogenado que recibe el nombre de sal de diazonio, esta reacción recibe el nombre de diazotación. Posteriormente, la sal de diazonio formada reacciona con otro compuesto aromático (fenoles,

arilaminas) en frío dando paso al proceso conocido como copulación, formando así el colorante azoico (Sanz, s.f.).

Dióxido de Titanio: Es un óxido metálico formado por la combinación de titanio más oxígeno. El dióxido de titanio es uno de los fotocatalizadores más utilizados en procesos de tratamientos de aguas, debido a que no es tóxico y a su facilidad de adquisición. Este fotocatalizador es muy selectivo en su espectro de absorción, ya que no absorbe la luz en el espectro visible, pero si lo hace en el espectro ultravioleta. La estructura cristalina de este óxido metálico facilita la degradación fotocatalítica de los contaminantes (Universidad de Salamanca, s.f.).

2.2. Parámetros fisicoquímicos de calidad de agua

Turbidez: Es la dificultad que posee el agua para transmitir la luz, debido a la existencia de materiales insolubles en suspensión muy finos, presentes en aguas superficiales principalmente. Este material es difícil de filtrar y decantar, causando así acumulaciones en equipos y conductos de agua, lo cual provoca alteraciones en los procesos en los cuales se destine este tipo de agua (Rigola, 1990).

Este parámetro señala que a mayor turbidez mayor es el grado de contaminación del agua. Cuando un efluente presenta valores de turbidez elevados este se encuentra contaminado, y dicha contaminación afecta principalmente a la fotosíntesis, respiración y reproducción de la vida acuática (Gonzales, 2011).

DQO: La DQO (Demanda química de oxígeno), es la prueba que permite determinar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica presente en un agua residual, bajo condiciones concretas de temperatura, tiempo y agentes oxidantes (Rodríguez, 2007).

La medición de este parámetro se basa en el método normalizado de dicromato potásico. Su medición se lleva a cabo para la determinación de las exigencias de oxígeno que requiere un efluente antes de someterse a un tratamiento. La DQO se expresa en mg O₂/L Moreno, 2006).

2.3. Tipos de contaminación

Contaminación química: Efecto causado por la entrada al ambiente de sustancias naturales que rebasan los mecanismos de degradación propios de un ecosistema, o por la entrada de sustancias xenobióticas al medio para las cuales no existe un mecanismo de defensa que pueda degradar dicha sustancia. Este tipo de contaminación es causado principalmente por la industrialización y el avance progresivo de la tecnología (Albert, 2006).

Contaminación hídrica: Se define a este tipo de contaminación como la alteración de las características físicas, químicas, organolépticas, radioactivas y microbiológicas que presenta un cuerpo de agua, como resultado de las actividades humanas o naturales propias del ecosistema. Este tipo de contaminación se efectúa cuando suceden derrames directos o indirectos de desechos que provocan un incremento en la degradación de las aguas (Segura, 2007).

Contaminación visual: Tipo de contaminación que se percibe o se evidencia a través de la vista debido a elementos extraños a un ecosistema que alteran la imagen del paisaje tanto en zonas rurales como urbanas generando así una sobreestimulación visual agresiva e invasiva (García, s.f.).

2.4. Método de análisis (Espectrofotometría)

Espectrofotometría: Esta técnica se caracteriza por su sensibilidad, precisión y por su aplicabilidad a moléculas de distintos tipos de naturaleza y estados de

agregación. Los fundamentos fisicoquímicos de la técnica son relativamente sencillos (Universidad Pablo de Olavide, 2015).

La técnica sirve principalmente para determinar qué concentración de un compuesto existe dentro de una solución. Su fundamento se basa en la absorción de radiación electromagnética de las moléculas de la solución. La técnica se realiza con un espectrofotómetro, en donde se indica la longitud de onda de luz que pasará por determinada muestra, para así medir la luz absorbida por la misma (Abril et al., 2006).

Absorbancia: Es la cantidad de luz que una muestra absorbe. La cantidad de luz que absorba dependerá de la distancia que traspasa la luz a través de la muestra o solución del cromóforo (parte de una molécula encargada de dar color a una sustancia) y de su respectiva concentración (Abril et al., 2006).

Longitud de onda: Es la distancia lineal que existe entre dos mínimos o dos máximos sucesivos de una onda. Las unidades de medida de la longitud de onda son: Angstrom, nanómetros, micrómetros (Valladares, s.f.).

2.5. Tipos de tratamientos de aguas por oxidación avanzada

Históricamente los tratamientos de aguas residuales se han realizado por distintos tipos de procesos tales como, precipitación - floculación, cloración o incluso por adsorción con carbón activado; pero debido a que en ciertos casos la toxicidad de los contaminantes en el agua resulta muy elevada, estos mecanismos suelen ser ineficientes, por lo que se les ha reemplazado por tratamientos de oxidación avanzada (Sanz, Lombraña y De Luis, 2012).

Entre los diferentes tratamientos de aguas por oxidación avanzada tenemos:

2.5.1. Fotocatálisis Heterogénea

Este proceso de oxidación avanzada es uno de los más prometedores para el tratamiento de aguas residuales con contaminantes sintéticos, debido a que al ser un proceso de degradación fotocatalítica la luz solar empleada permite una reducción en los costos frente a otros tipos de degradación. (Garcés y Peñuela, 2004).

La fotocatalisis heterogénea posibilita además de la degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos su mineralización, esto a través del uso de un catalizador que generalmente resulta ser un óxido metálico; que en conjunto con una fuente de radiación (luz solar) y la presencia de oxígeno atmosférico que actúa como agente oxidante, logran realizar la reacción de degradación. Es decir, este proceso de oxidación se basa en la excitación electrónica del catalizador empleado en estado sólido, que se sumerge dentro de la solución y con la absorción de la energía solar produce reacciones de óxido – reducción en las diferentes zonas de la interfase que existe entre la solución y el catalizador, permitiendo la degradación del colorante sintético (Corzo y Vega, 2012).

2.5.2. Ozonización catalítica

La ozonización catalítica es un proceso de depuración de agua perteneciente al grupo de oxidación avanzada, en donde las moléculas de ozono que son altamente oxidantes participan en diversas reacciones químicas con sustancias orgánicas e inorgánicas. Consiste en la descomposición del ozono disuelto y la formación de radicales hidroxilos (OH) altamente oxidantes, que en conjunto con un catalizador (óxido metálico) contribuyen a la degradación del contaminante. A pesar de esto, el trabajar con ozono implica problemas por su alta corrosividad y por el costo inicial de equipamiento para implementar este sistema de tratamiento de aguas residuales, siendo así un problema el consumo de energía (Universidad de Alcalá, 2008).

2.5.3. Ozonización fotocatalítica

La ozonización fotocatalítica no es más que la combinación de los métodos anteriormente mencionados, lo que resulta en un método altamente efectivo para la degradación de contaminantes por su alta capacidad de oxidación y por representar un ahorro en cuanto al consumo de energía, ya que este método de oxidación avanzada utiliza la luz solar; pero debe considerarse que el costo para la obtención de ozono es significativo. Actualmente, este método, a pesar de su efectividad únicamente ha sido probado a escala piloto. (Bustamante, 2015).

2.6. Resultados de estudios previos basados en fotocatalisis

Previo a la realización de este estudio existieron varios trabajos en los cuales se realizaron procesos de degradación fotocatalítica para colorantes, en donde se utilizaron diferentes tipos de catalizadores (óxidos metálicos), colorantes, fuentes de radiación UV, tiempos de exposición a la luz UV, entre otras variables con el fin de obtener resultados óptimos y representativos en cuanto a la degradación del colorante.

El dióxido de titanio, empleado como catalizador para el proceso de fotocatalisis en varios estudios, ha generado porcentajes altos de degradación de los diferentes tipos de colorantes ya sean estos de origen sintético u orgánico.

Uno de los estudios realizados indica que con la utilización de dióxido de titanio (0.5 g/L aproximadamente) en una solución de agua con colorante naranja ácido 24 con concentración de 200 mg/L, se obtuvo una degradación del 6% del colorante en aproximadamente 6 h lo cual es indicativo de que las condiciones seleccionadas para el tratamiento no son viables para la industria debido a su bajo porcentaje de degradación del colorante. Debido a estos resultados, los mismos autores realizaron un proceso de degradación fotocatalítica homogénea en donde se obtuvieron mejores resultados de degradación (95% de remoción de colorante en aproximadamente 18 min), siendo así este método más factible

para la degradación fotocatalítica del colorante naranja ácido 24 según este estudio (Chacón, Leal, Sánchez y Bandala, 2002).

Adicionalmente, se realizó otro estudio con dióxido de titanio utilizando colorante naranja reactivo 84, donde su concentración en las aguas formadas fue de 340 mg/L. La concentración de catalizador varió de 40 a 100 mg/L. En este estudio además se utilizó peróxido de hidrógeno en las soluciones para que actuara como oxidante del colorante. Los resultados obtenidos indicaron una degradación mayoritaria del 87.34% cuando se utilizó una concentración de 40 mg/L de TiO_2 y 2 ml de H_2O_2 /L, convirtiéndolo en un proceso viable para la degradación de colorante. El estudio concluyó que a menor concentración de TiO_2 y H_2O_2 el porcentaje de degradación aumenta y a su vez el proceso ocurre de una manera más rápida (Garcés y Peñuela, 2004).

En otro estudio se realizó el proceso de degradación fotocatalítica con colorante Rodamina B. Para este se prepararon soluciones con concentraciones de colorante que variaron entre 15 a 30 mg/L. A diferencia de los tratamientos anteriores, se utilizó óxido de zinc como catalizador en un rango de 100 a 400 mg por cada 100 ml de la solución preparada. Las aguas formadas fueron expuestas a un máximo de 50 min de radiación UV, para lograr el proceso de degradación. Los mejores resultados de este estudio se dieron cuando la concentración de colorante fue de 20 mg/L y la concentración de ZnO fue de 300 mg por cada 100 ml de solución, logrando así porcentajes de degradación entre 97 y 99 %, lo que indicó que el proceso es viable para la degradación de colorante. La investigación además determinó que a mayor concentración de colorante y catalizador mayor será el porcentaje de degradación, teniendo en cuenta que una concentración demasiado elevada de ambos retrasaría el proceso, ya que impedirían el desplazamiento de fotones libres en la solución (Corzo y Vega, 2012).

3. Diseño del plan experimental y Metodología

3.1. Diseño del plan experimental

Se estudiaron dos formas de degradación fotocatalítica según la fuente de exposición a la radiación ultravioleta, una proveniente de la luz solar y otra de una fuente artificial (cámara UV).

Por exposición a la cámara ultravioleta se obtuvieron 36 resultados de degradación de colorante, ya que se probaron con 3 diferentes tipos de concentración de colorante, 4 concentraciones de catalizador y 3 tiempos de exposición a la cámara ultravioleta. Además, cada uno contó con 3 repeticiones para garantizar reproducibilidad de los resultados; es decir, al final de la experimentación se obtuvieron 108 resultados de degradación de colorante, con soluciones expuestas a la cámara ultravioleta.

Adicionalmente, se obtuvieron 5 resultados de degradación de colorante con exposición a la luz solar. Aquí, se escogieron las 5 aguas residuales cuya degradación fue más eficiente a la exposición de la cámara ultravioleta, con su respectiva combinación de concentración de colorante, concentración de catalizador y tiempo de exposición; para tratarlas mediante exposición a la luz solar. Además, cada una contó con 3 repeticiones para garantizar reproducibilidad de los resultados; es decir, al final de la experimentación se obtuvieron 15 resultados de degradación de colorante, con soluciones expuestas a luz solar.

Los resultados obtenidos permitieron determinar cuál fue la concentración óptima de catalizador para tratar las aguas residuales, en el menor tiempo de exposición a la luz ultravioleta proveniente de la cámara UV o de la luz solar.

3.1.1. Medición del porcentaje de degradación del colorante sintético localizado en las aguas residuales

Una vez tratadas las muestras, estas reposaron por un tiempo de 36 h para precipitar el dióxido de titanio y proceder a realizar la medición correspondiente. La degradación del colorante localizado en las aguas sintéticas fue medida con el espectrofotómetro a una longitud de onda de 520 nm, para así determinar el porcentaje de absorbancia que presentaron las mismas después del tratamiento. Una vez obtenidas las mediciones de absorbancia en el espectro visible, se puede obtener el porcentaje de decoloración de una muestra, a través de la siguiente formula:

$$\% \text{ Decoloración} = \frac{\sum A_a - \sum A_b}{\sum A_a} \times 100$$

Donde:

Aa: absorbancia de la muestra original

Ab: absorbancia de la muestra tratada (Londoño, 2001).

3.2. Metodología

3.2.1. Tipo de tratamiento de agua por oxidación avanzada a emplearse

Para degradar el colorante sintético de aguas residuales de la industria textil, se utilizó un proceso de oxidación avanzada por fotocatalisis heterogénea.

3.2.2. Materiales

- Cámara de luz ultravioleta
- Dióxido de Titanio (Catalizador)
- Vasos de precipitación de 100 ml
- Colorante sintético rojo drimarén cl-5b (Azoico)

- Espectrofotómetro
- Agitador
- Pipetas
- Balanza analítica

3.2.3. Especificaciones de la cámara de luz ultravioleta

La cámara de luz ultravioleta se construyó con madera con las siguientes dimensiones: 55 cm de largo por 25 cm de ancho y 25 cm de altura. Interiormente estuvo recubierta con papel aluminio, mismo que dio una superficie reflejante al interior de la cámara permitiendo así mayor reflectividad de la luz UV hacia las aguas tratadas. La cámara contó con un foco ultravioleta de 15 W.

3.2.4. Preparación de las aguas residuales sintéticas

3.2.4.1. Concentración de colorante utilizado

La experimentación del proyecto se realizó en el Laboratorio de Tratamiento de Aguas de la Universidad de las Américas. De acuerdo con la bibliografía, sabemos que la concentración promedio de colorante de las aguas residuales del proceso de tintura en la industria textil varía entre 10-30 mg/ (L de agua), por lo que se procedió a preparar soluciones de agua sintética con el colorante rojo drimarén cl-5b, utilizado para el teñido de fibras de algodón. Las soluciones formadas fueron tratadas en vasos de precipitado de 100 ml, empleando las siguientes concentraciones: 10 mg/L, 20 mg/L y 30 mg/L.

3.2.4.2. Concentración de catalizador utilizado

Como siguiente paso, en cada solución anteriormente señalada se añadieron diferentes concentraciones del catalizador dióxido de Titanio, sin embargo, una muestra permaneció sin catalizador (muestra cero) (Corzo y Vega, 2012). Las concentraciones utilizadas fueron: 0 g/L de solución, 2 g/L de solución, 3 g/L de

solución y 4 g/L de solución.

3.2.4.3. Tiempos de exposición a la cámara de luz UV empleados

Las aguas residuales preparadas fueron colocadas en la cámara de luz ultravioleta, exponiéndolas a los siguientes lapsos de tiempo a la luz UV: 3 h, 6 h y 9 h.

3.2.4.4. Tiempos de exposición a la luz UV solar empleados

Finalmente, las aguas residuales cuya exposición correspondió a la luz solar fueron expuestas a la misma en días en los cuales las condiciones atmosféricas se mantuvieron similares, en temperatura y radiación solar, es decir, se procuró que la cantidad de rayos UV fuera relativamente la misma; por consiguiente, las muestras fueron analizadas durante los lapsos de tiempo en donde se alcanzó el mayor grado de degradación con los tratamientos expuestos a la cámara UV.

3.2.4.4.1. Recopilación de datos INHAMI

Una vez que las muestras fueron expuestas en los respectivos días y horas, se procedió a recopilar datos en el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) de la radiación UV producida en esos días y se sacó un promedio de esta; que fue considerado como la radiación media utilizada.

3.2.5. Envío de aguas residuales al gestor

Las muestras resultantes fueron enviadas a un gestor ambiental quién determinó si las concentraciones de contaminantes en las aguas residuales estuvieron bajo la normativa para que así pudiesen ser vertidas directamente en donde ellos consideraban pertinente.

4. Resultados

4.1. Porcentaje de degradación de colorante en las muestras de agua residual con exposición a la cámara UV

Los porcentajes de degradación de colorante utilizando la cámara UV, tuvieron diversos resultados, siendo las muestras en las que no se usó dióxido de titanio las que menores porcentajes de degradación presentaron. Los resultados se pueden observar en la tabla 1.

4.2. Selección de condiciones con mayor efectividad de degradación de colorante mediante exposición a la cámara UV

Los resultados de degradación de colorante con la cámara UV indicaron que la concentración óptima de catalizador empleada fue de 2 g/L, en un tiempo de exposición de 6 h, para todas las concentraciones de colorante utilizadas, no obstante, las muestras cuya concentración de colorante fue de 20 mg/L obtuvieron los porcentajes más elevados de degradación. Las combinaciones de parámetros anteriormente mencionados fueron seleccionadas para tratarlas mediante exposición a la luz solar.

Las muestras expuestas a 9 h tuvieron de la misma manera resultados de degradación elevados, pero no muy superiores a los de 6 h; por lo que se consideró que no es significativa la diferencia del porcentaje de degradación de colorante entre las muestras tratadas de 6 h a 9 h, por ende, se consideró como mejor tiempo de exposición para la degradación 6 h ya que de esta manera se optimizaría el tiempo de exposición de las aguas, cuando este proceso sea empleado en la industria. De esta manera se determinó que los 5 tratamientos con mayor eficacia fueron los que se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 1.

Resultados de degradación en muestras expuestas a la cámara UV.

Nº de muestra	Concentración de colorante (mg/L)	Concentración de TiO ₂ (g/L)	Tiempo de exposición (h)	% Degradación
1	10	0	3	37.8
2	10	0	6	39.9
3	10	0	9	41.2
4	10	2	3	88.2
5	10	2	6	89.7
6	10	2	9	90.5
7	10	3	3	84.3
8	10	3	6	85.3
9	10	3	9	86.3
10	10	4	3	63.6
11	10	4	6	68.1
12	10	4	9	73.8
13	20	0	3	5.9
14	20	0	6	6.8
15	20	0	9	13.4
16	20	2	3	42.3
17	20	2	6	96.0
18	20	2	9	96.7
19	20	3	3	36.1
20	20	3	6	94.5
21	20	3	9	95.0
22	20	4	3	14.5
23	20	4	6	90.0
24	20	4	9	90.9
25	30	0	3	3.4
26	30	0	6	5.2
27	30	0	9	7.2
28	30	2	3	70.6
29	30	2	6	73.1
30	30	2	9	76.4
31	30	3	3	44.3
32	30	3	6	47.7
33	30	3	9	50.8
34	30	4	3	16.8
35	30	4	6	20.0
36	30	4	9	23.3

Tabla 2.

Tratamientos con mayor porcentaje de degradación en la cámara UV.

Concentración de colorante (mg/L)	Concentración de TiO ₂ (g/L)	Tiempo de exposición (h)
20	2	6
20	2	9
20	3	6
20	3	9
20	4	6

4.3. Porcentaje de degradación de colorante en las muestras de agua residual con exposición a luz solar

Se escogieron los cinco mejores tratamientos cuya exposición fue a la cámara UV y cuyas condiciones fueron las mejores para el proceso de degradación del colorante, para tratarlas mediante exposición a la luz solar. Los resultados de las muestras tratadas se observan en la tabla 3.

Tabla 3.

Resultados de degradación en muestras expuestas a la radiación solar.

N° de muestra	Concentración de colorante (mg/L)	Concentración de TiO ₂ (g/L)	Tiempo de exposición (h)	% Degradación
1	20	2	6	85.1
2	20	2	9	85.8
3	20	3	6	83.0
4	20	3	9	83.8
5	20	4	6	81.1

Una vez realizadas las mediciones de degradación de colorante se procedió a recopilar datos en el INHAMI, para conocer la radiación que existió en los días y horas en los cuales las muestras fueron expuestas. Las muestras se expusieron en dos días entre las 11:00 y 16:00 horas. Los datos recopilados nos indican la radiación solar global existente en esos días y horas, y de la misma manera la radiación solar reflejada. Estos datos fueron obtenidos de la Estación

Meteorología Iñaquito. Las medidas de radiaciones se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4.

Radiación solar producida en los días de tratamiento.

Fecha/Hora	Radiación solar global w/m ²	Promedio radiación solar global w/m ²	Radiación solar reflejada w/m ²	Promedio radiación solar reflejada w/m ²
16/5/2017 11:00	1008.7		187.6	
16/5/2017 12:00	962.2		173	
16/5/2017 13:00	716.4	486.6	125.7	88.7
16/5/2017 14:00	119.1		21.1	
16/5/2017 15:00	62.1		13.5	
16/5/2017 16:00	51.3		13.8	
17/5/2017 11:00	992.8		184.0	
17/5/2017 12:00	984.3		177.6	
17/5/2017 13:00	543	485.5	97.4	90.8
17/5/2017 14:00	218.9		41.7	
17/5/2017 15:00	85.1		22.3	
17/5/2017 16:00	91.5		22.0	

4.4. Comparación de efectividad entre métodos por captación de radiación UV

Una vez tratadas las muestras con luz solar se procedió a comparar sus resultados con las muestras de la cámara UV. Los resultados con exposición a la cámara UV reflejaron una mayor efectividad frente a los que usaron luz solar, siendo estos mejores en un rango de 8.9 a 11.5 en porcentaje de degradación. Si bien los resultados de degradación luz solar fueron elevados, si existe una diferencia significativa entre estos en comparación de los resultados de cámara UV, como se observa más adelante en el análisis estadístico.

De acuerdo con los resultados obtenidos se determinó que el método que usó la cámara UV fue el más efectivo. La comparación entre los resultados se puede evidenciar en la tabla 5.

Tabla 5.

Comparación de resultados de muestras expuestas a la cámara UV y a la luz solar.

Parámetros establecidos	% Degradación cámara UV	% Degradación luz solar	Diferencia % de degradación
Colorante 20 mg/l – 2 g/L TiO ₂ 6 h	96.0	85.1	10.9
Colorante 20 mg/l – 2 g/L TiO ₂ 9 h	96.7	85.8	10.9
Colorante 20 mg/l – 3 g/L TiO ₂ 6 h	94.5	83.0	11.5
Colorante 20 mg/l – 3 g/L TiO ₂ 9 h	95.0	83.8	11.2
Colorante 20 mg/l – 4 g/L TiO ₂ 6 h	90.0	81.1	8.9

4.5. Discusión y análisis estadístico de los resultados obtenidos

Los primeros resultados corresponden a las aguas residuales preparadas con una concentración de colorante de 10 mg/L de agua. En total se obtuvieron 12 resultados de degradación de colorante con sus respectivas repeticiones, es decir, se trataron 36 aguas residuales con diferentes concentraciones de catalizador y tiempos de exposición a la cámara de luz UV.

Los mayores porcentajes de degradación de colorante se localizaron en las muestras cuya concentración de TiO₂ fue de 2 g/L. En las aguas residuales que se expusieron a 3 h de radiación UV la degradación alcanzó un total de 88.2%, mientras que en las aguas residuales que se expusieron a 6 h de radiación UV la degradación alcanzó un total de 89.7%. Finalmente, en las aguas residuales que se expusieron a 9 h de radiación UV la degradación alcanzó un total de 90.5%.

En las muestras testigo cuya concentración de fotocatalizador fue de 0, se obtuvo el menor porcentaje de degradación de colorante, siendo en 3 h de exposición a la luz UV de 37.8%, en 6 h de exposición a la luz UV de 39.9% y en 9 h de exposición a la luz UV de 41.2%, indicando así que el uso del fotocatalizador es indispensable en el proceso de degradación de colorante para las aguas residuales de la industria textil.

En esta parte de la experimentación se determinó que en las muestras tratadas con dióxido de titanio existe una tendencia que indicó que a mayor concentración de fotocatalizador utilizado (3 g/L y 4 g/L respectivamente) menor fue el porcentaje de degradación del colorante. Así mismo, en estas muestras los resultados obtenidos demostraron un mayor porcentaje de degradación cuando el tiempo de exposición de la luz UV fue mayor, es decir, cuando el tiempo de exposición fue de 6 y 9 h se lograron mayores resultados en comparación con el tiempo de 3 h.

Los siguientes resultados obtenidos correspondieron a las aguas residuales preparadas con una concentración de colorante de 20 mg/L de agua. En total se obtuvieron 12 resultados de degradación de colorante con sus respectivas repeticiones, es decir, se trataron 36 aguas residuales con diferentes concentraciones de catalizador y tiempos de exposición a la cámara de luz UV.

Los mayores porcentajes de degradación de colorante se localizaron en las muestras cuyas concentraciones de TiO_2 fueron de 2 g/L y 3 g/L. En las aguas residuales cuya concentración de TiO_2 fue de 2 g/L, la degradación alcanzó un total de 96.0% y 96.7%, en los tiempos correspondientes a 6 y 9 h; mientras que, en las muestras cuya concentración de TiO_2 fue de 3 g/L la degradación alcanzó un total de 94.5% y 95.0% respectivamente, para los mismos tiempos mencionados anteriormente.

En las muestras testigo cuya concentración de fotocatalizador fue de 0, se obtuvo el menor porcentaje de degradación de colorante, siendo en 3 h de exposición a

la luz UV de 5.9%, en 6 h de exposición a la luz UV de 6.8% y en 9 h de exposición a la luz UV de 13.4%, afirmando así que el uso del fotocatalizador es importante para lograr la degradación de colorante sintético en el proceso de fotocátalisis.

Con estos resultados de la experimentación se determinó que en las muestras tratadas con TiO_2 existe una tendencia que indicó que a mayor concentración de fotocatalizador utilizado, menor fue el porcentaje de degradación del colorante, esto debido a que, al utilizar las concentraciones de fotocatalizador de 3 y 4 g/L, los porcentajes de degradación empezaron a disminuir, comparándolos con los resultados donde se utilizó 2 g/L de TiO_2 , el motivo de esto fue que las muestras se sobresaturaron del óxido de titanio provocando que el proceso de fotocátalisis fallara, y a su vez que las muestras de agua absorbieran el color blanco del TiO_2 ; alterando los porcentajes de degradación del colorante. Los resultados además indicaron un mejor porcentaje de degradación cuando las muestras fueron expuestas por más tiempo a la cámara de luz UV.

En lo que respecta a la tendencia de los resultados cuando la concentración de colorante cambió de 10 a 20 mg/L, resultó ser la misma. Esto debido a que, los resultados indicaron que, a mayor concentración de catalizador, menor fue el porcentaje de degradación de colorante. La causa de esto fue que las concentraciones de 3 y 4 g/L de fotocatalizador fueron muy altas para este tratamiento provocando una sobresaturación de TiO_2 , ocasionando que el proceso de fotocátalisis no se diera adecuadamente, provocando que el agua residual absorbiera la coloración del fotocatalizador. Esto se debió principalmente al tamaño y peso reducido que poseen las partículas del TiO_2 perjudicando la turbidez en las aguas residuales y dificultando así la difusión de la luz ultravioleta, lo que originó la aparición de sólidos suspendidos que provocaron que la coloración de las muestras cambie, interfiriendo así con los resultados de degradación (Garcés, Mejía y Santamaría, 2004).

Por esta razón, se requieren procesos de decantación del óxido metálico en los cuales se emplean tiempos de residencia excesivos con el fin de economizar el costo del tratamiento, por otro lado, se puede optar por procesos más complejos de separación del dióxido de titanio del agua, como por ejemplo la separación magnética, sedimentación acelerada mediante proceso de coagulación o filtración de diversos tipos (Portela, 2008).

Los últimos resultados obtenidos de degradaron de colorante con la cámara UV correspondieron a las aguas residuales preparadas con una concentración de colorante de 30 mg/L. En total se obtuvieron 12 resultados de degradación de colorante con sus respectivas repeticiones, es decir, se trataron 36 aguas residuales con diferentes concentraciones de catalizador y tiempos de exposición a la cámara de luz UV.

Los mejores resultados de degradación de colorante se localizaron en las muestras cuya concentración de TiO_2 fue de 2 g/L. Los porcentajes de degradación en estas aguas residuales alcanzaron un total de 70.6%, 73.1% y 76.4% en los tiempos correspondientes a 3, 6 y 9 h.

Las muestras cero de esta parte de la investigación obtuvieron los menores porcentajes de degradación de colorante, los resultados fueron en 3 h de exposición a la luz ultravioleta de 3.4%, en 6 h 5.2% y en 9 h 7.2% respectivamente, confirmando así que el uso de un óxido metálico es indispensable en el proceso de degradación fotocatalítica de colorante sintético para aguas residuales de la industria textil.

Una vez concluida esta parte de la investigación, se determinó que la concentración óptima de dióxido de titanio a usar es de 2 g/L, para la concentración de colorante de 30 mg/L, esto debido a que con las concentraciones de 3 y 4 g/L las aguas residuales se sobresaturaron de TiO_2 provocando que el proceso de fotocátalisis no se realizara adecuadamente, y a su vez que las muestras de agua absorbieran el color blanco del óxido de titanio, alterando los porcentajes de degradación del colorante. Sin embargo, los

resultados volvieron a indicar un mejor porcentaje de degradación cuando las muestras fueron expuestas por más tiempo a la cámara de luz UV.

Los análisis estadísticos del estudio se realizaron con el programa SPSS, y las gráficas comparativas de los diferentes porcentajes de degradación según los parámetros empleados, con la aplicación Microsoft Excel.

Los primeros datos analizados en el programa estadístico fueron la degradación de colorante en base a las concentraciones del mismo empleadas en las muestras tratadas con exposición a la cámara UV. Se determinaron las medias de degradación para cada concentración de colorante, excluyendo los porcentajes de degradación de las muestras cero. Los resultados indicaron que la mayor media de degradación se obtuvo en las muestras cuya concentración fue de 10 mg/L, seguido de las muestras de 20 mg/L y finalizando con las muestras de 30 mg/L. Este análisis indicó similitud con los resultados obtenidos en cuanto a cuál concentración de colorante permitió en conjunto del total de las muestras tratadas una mayor cantidad de degradación, sin embargo, fue la concentración de 20 mg/L la óptima, ya que con esta se obtuvieron los porcentajes de degradación más altos, como se puede evidenciar en la tabla 6.

Tabla 6.

Análisis de medias de degradación en función a la concentración de colorante con cámara UV.

Concentración de colorante (mg/L)	N° de muestras	Media	Mínimo	Máximo
10	12	81.089	63.6	90.5
20	12	72.889	14.5	96.7
30	12	47.000	16.8	76.4
Total	36	66.992	14.5	96.7

El análisis ANOVA, indicó que la concentración de colorante es significativa en el proceso de degradación del mismo, para este estudio, tal y como se demuestra con los resultados obtenidos en la tabla 7.

Tabla 7.

Análisis ANOVA en función de la concentración de colorante con cámara UV.

Parámetro	Significancia	El programa SPSS indica que un parámetro es significativo cuando este es menor a 0.05, caso contrario no tendrá significancia en el estudio.
Concentración de colorante	.032	

El programa estadístico además de indicar la significancia del proceso global en sí también señala si existe significancias entre cada uno de los parámetros utilizados en el análisis, es así como el programa estadístico analizó la significancia que existió entre los resultados según las diferentes concentraciones de colorante.

Se determinó que entre las concentraciones de 10 y 20 mg/L no existió significancia en cuanto a resultados, no obstante, los resultados obtenidos con la concentración de 20 mg/L obtuvieron porcentajes de degradación mayores, por lo que se consideró a esta concentración la óptima para el proceso de degradación. El programa indico que entre las concentraciones de 20 y 30 mg/L no existió significancia, pero entre las concentraciones de 10 y 30 mg/L ya existe una significancia resultado de la diferencia que presentan sus porcentajes de degradación. La comparación de significancias se puede evidenciar en la tabla 8.

Tabla 8.

Análisis de significancias entre las concentraciones de colorante con cámara UV.

Concentración de colorante (mg/L)	Concentración de colorante (mg/L)	Diferencia de medias	Significancia
10	20	13.8833	.511
	30	34.1583*	.025
20	10	-13.8833	.511
	30	22750	.247
30	10	-34.1583*	.025
	20	-22750	.247

Una vez analizados los resultados de porcentaje de degradación según la concentración de colorante empleada en las aguas residuales, se pudo decir que, a mayor concentración de colorante menor fue la degradación producida del mismo, como se puede evidenciar en la figura 1.

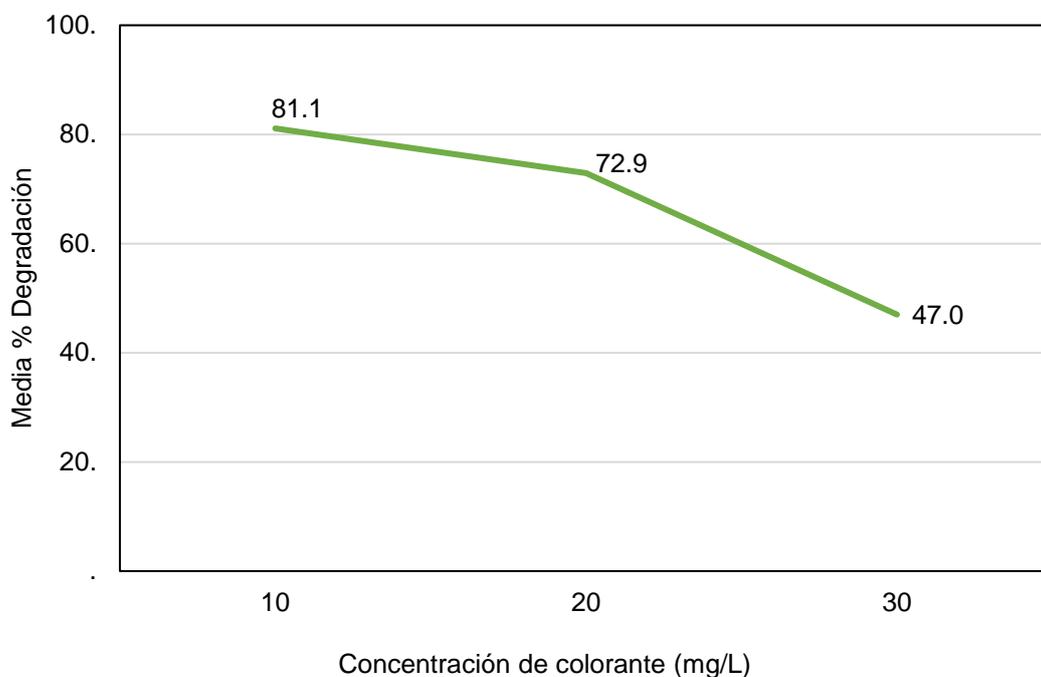


Figura 1. Curva de degradación en función de la concentración de colorante con cámara UV.

Una vez analizados los resultados en base a la concentración de colorante, se procedió a realizar el análisis de los parámetros tiempo y concentración de fotocatalizador.

El análisis estadístico prosiguió con los resultados en función al tiempo, con exposición a la cámara UV. Las figuras 2, 3, 4 y 5 representan los resultados para la concentración de colorante de 10 mg/L. Las figuras nos indican que, a mayor tiempo, mayor es la cantidad de degradación de colorante, sin embargo, los porcentajes de degradación no varían de una manera significativa entre los tiempos de 6 y 9 h respectivamente.

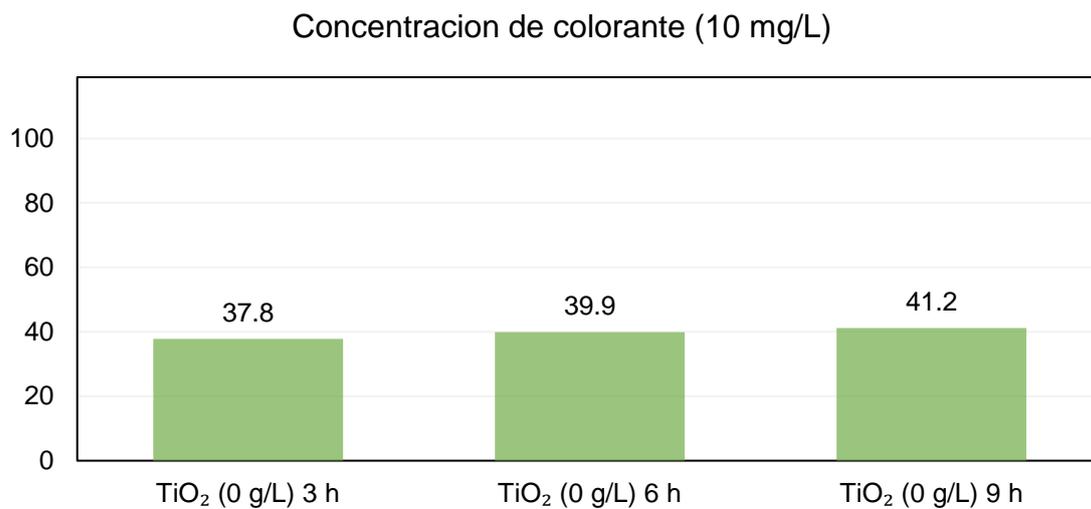


Figura 2. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 0 g/L).

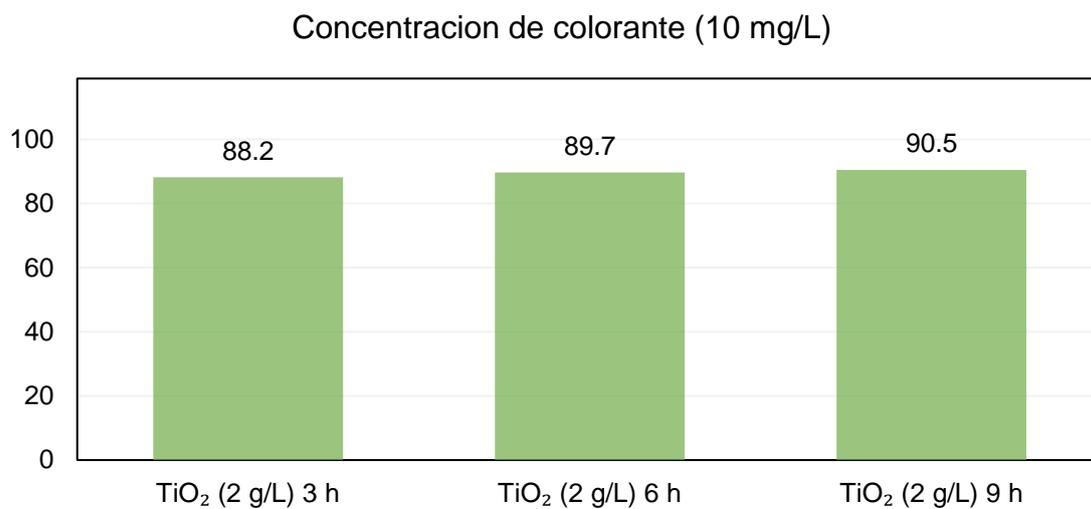


Figura 3. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 2 g/L).

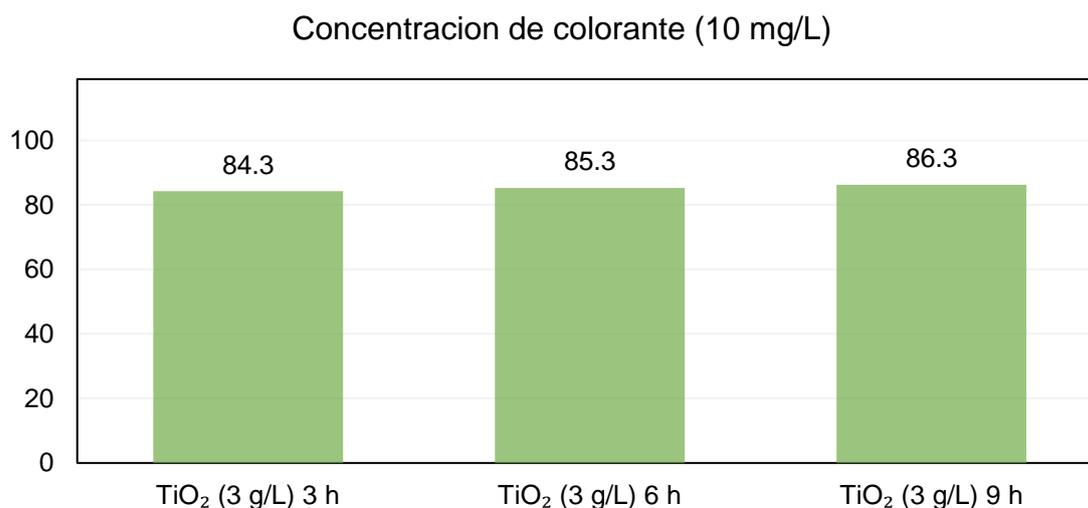


Figura 4. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 3 g/L).

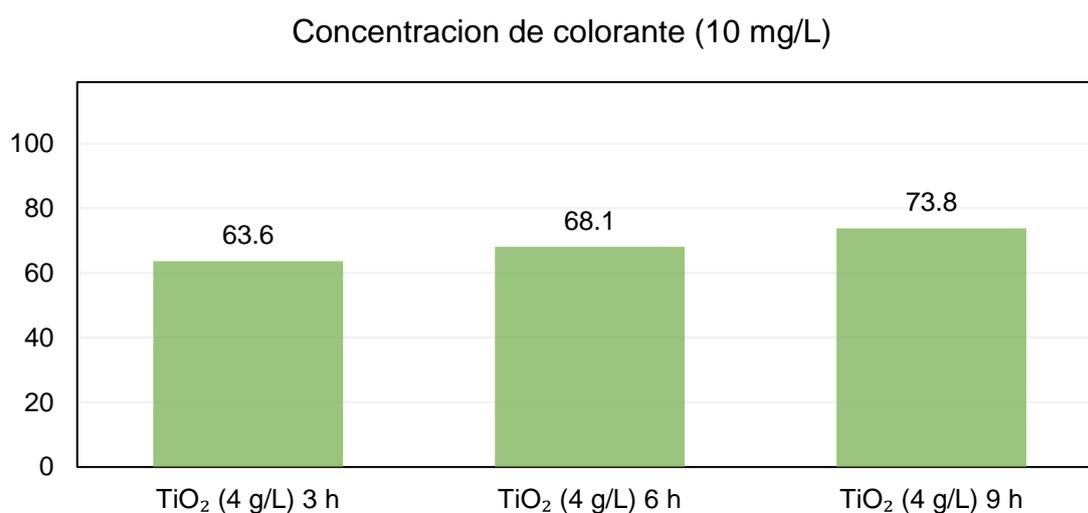


Figura 5. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 4 g/L).

El análisis continuó con los resultados para la concentración de colorante de 20 mg/L (Figuras 6, 7, 8 y 9). Estas figuras nos vuelven a indicar que, a mayor tiempo de exposición, mayor es la cantidad de degradación de colorante, y es aquí en donde se empieza a notar la necesidad de aplicar un fotocatalizador para el proceso de degradación de colorante.

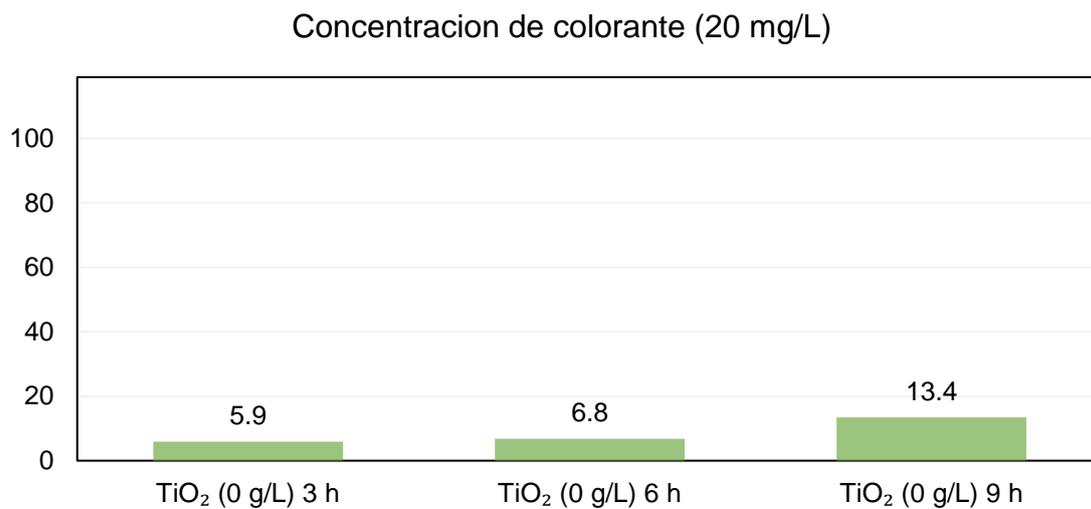


Figura 6. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 0 g/L).

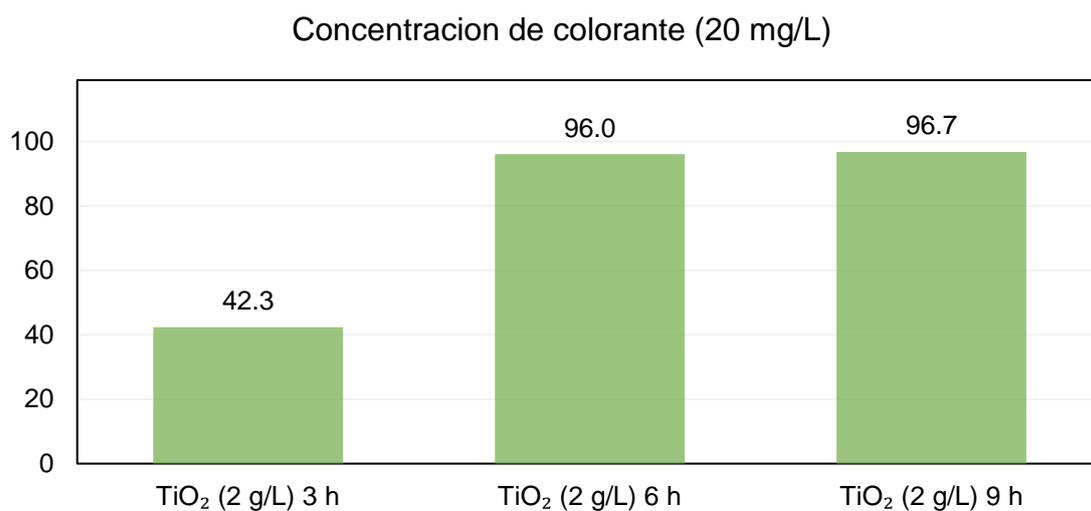


Figura 7. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 2 g/L).

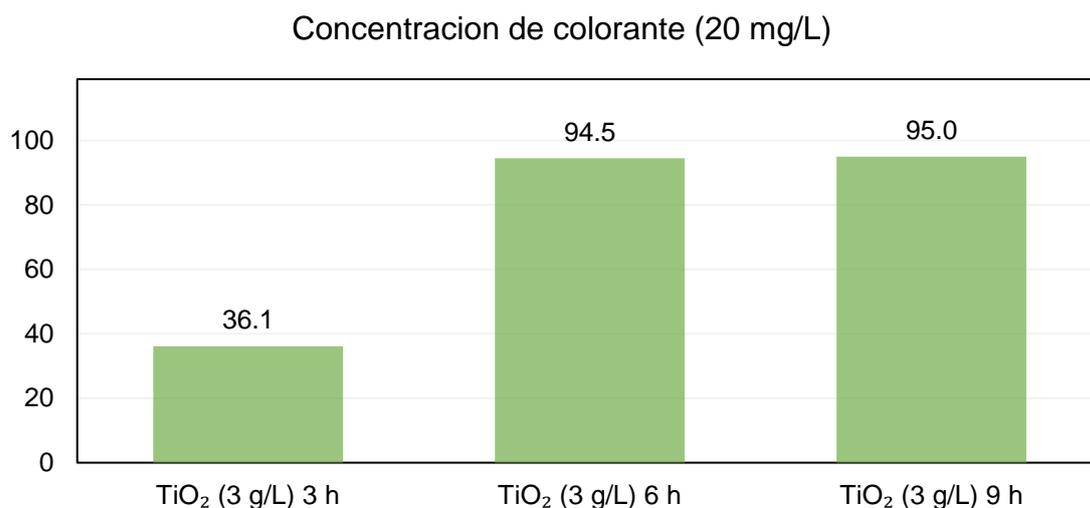


Figura 8. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 3 g/L).

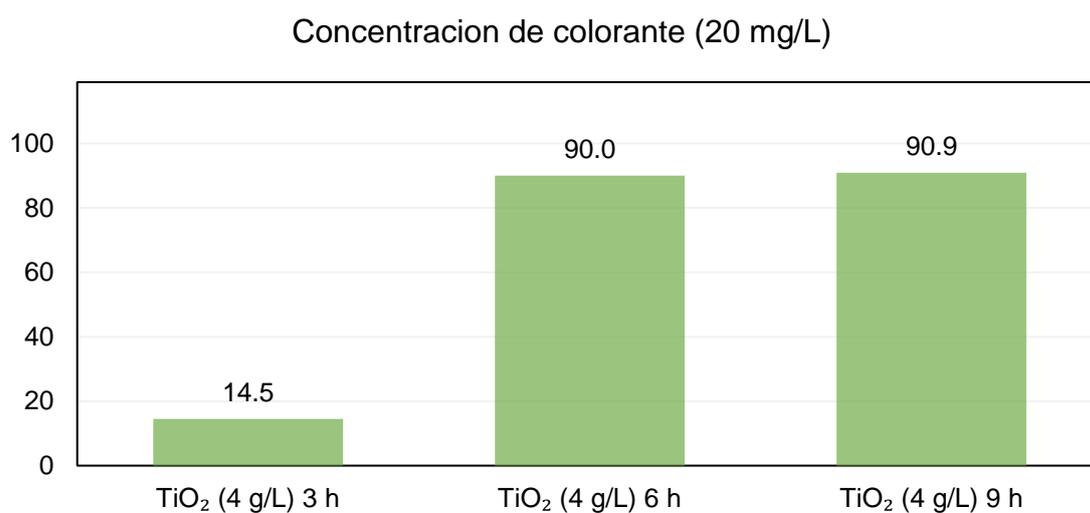


Figura 9. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 4 g/L).

Para terminar con el análisis de resultados en función del tiempo, tenemos la concentración de colorante de 30 mg/L, en donde los resultados arrojados nos confirmaron que a mayor tiempo de exposición mayor sería el porcentaje de degradación de colorante, estos resultados se ven reflejados en las figuras 10, 11, 12 y 13.

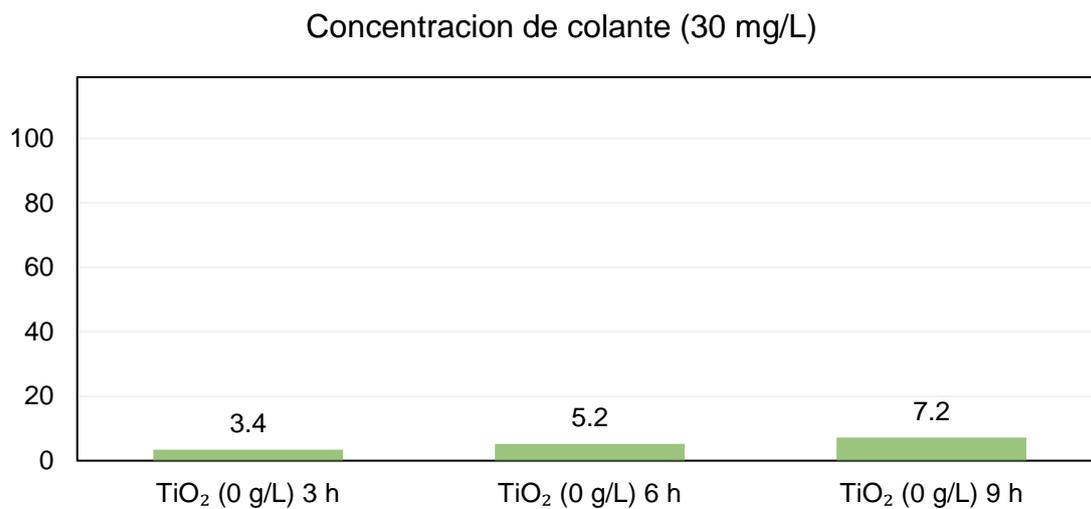


Figura 10. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 0 g/L).

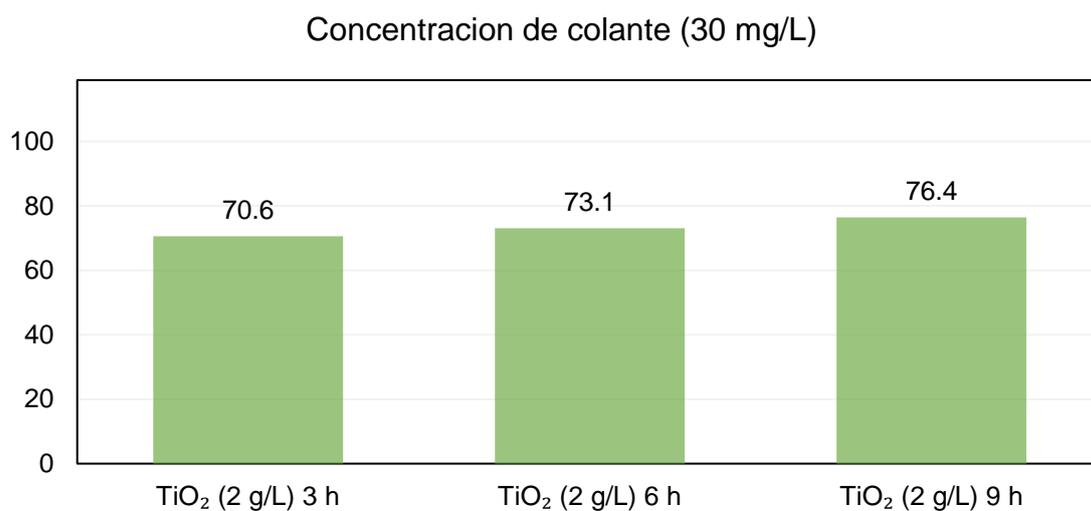


Figura 11. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 2 g/L).

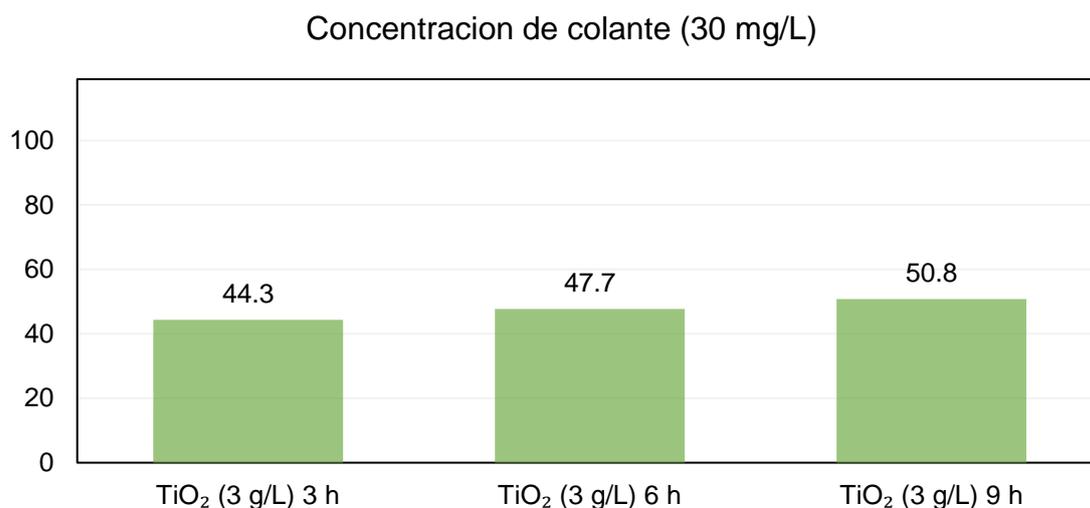


Figura 12. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 3 g/L).

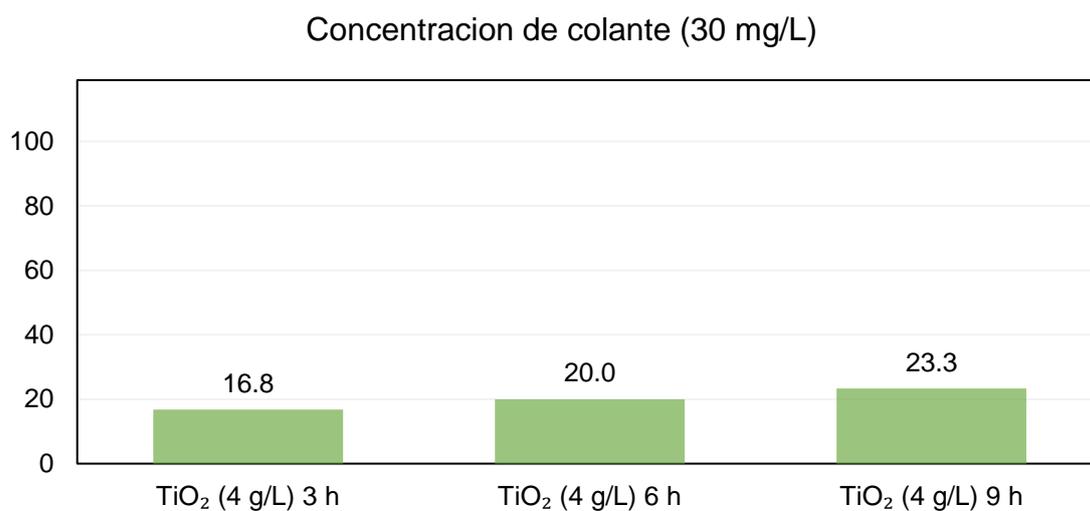


Figura 13. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al tiempo (TiO₂ 4 g/L).

En la figura 14 podemos observar el total de porcentaje de degradación de las muestras en función al tiempo de exposición, en donde se comprueba que las muestras expuestas por 6 y 9 h respectivamente lograron el mayor porcentaje de degradación. Las muestras cuya exposición fue de 9 h tuvieron los mejores resultados, seguido de las muestras de 6 h pero con una diferencia muy pequeña

de porcentaje de degradación, por lo que se consideró al tiempo de 6 h el óptimo para el estudio realizado.

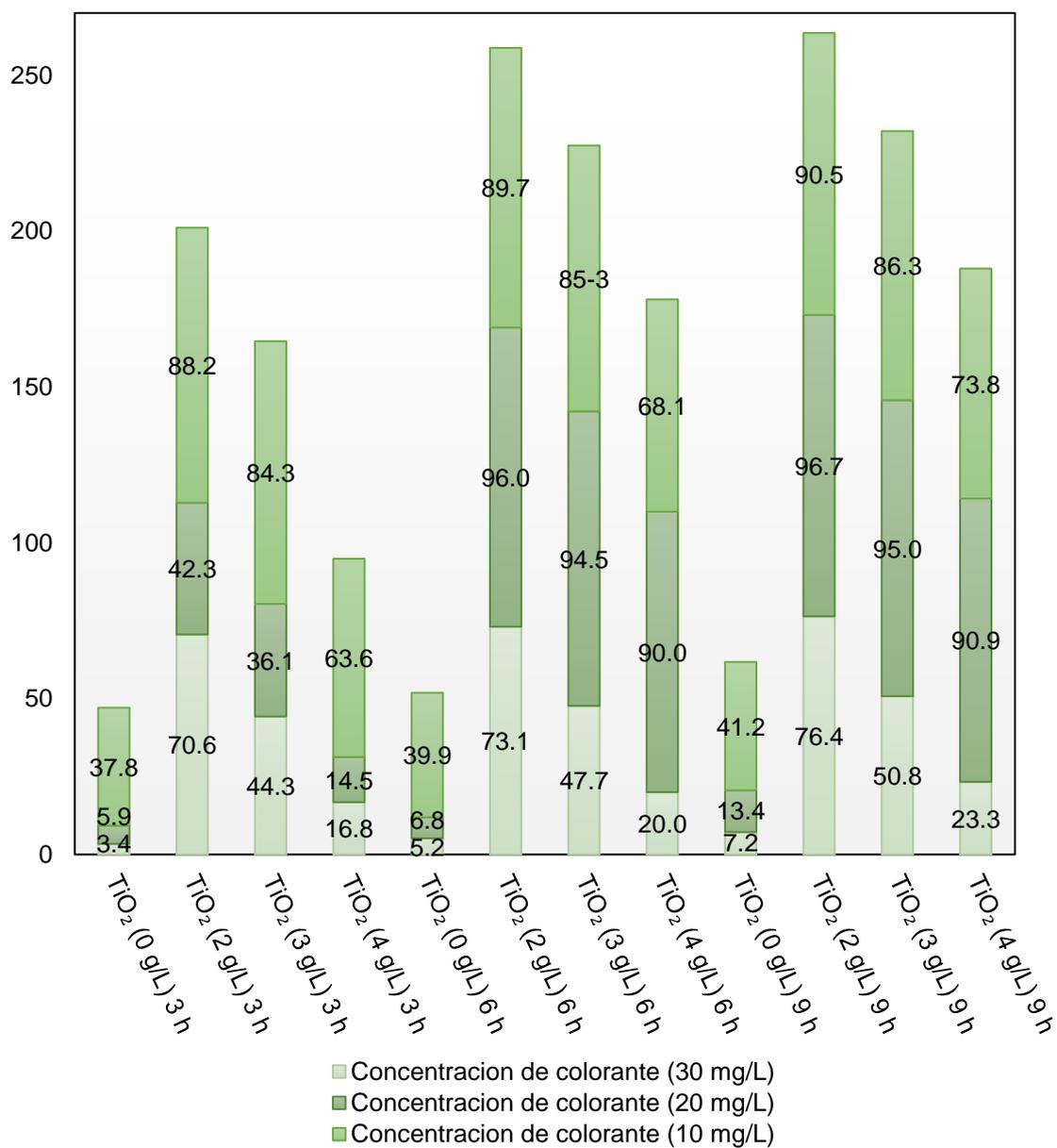


Figura 14. Degradación total de colorante en función al tiempo con cámara UV.

Una vez realizado el análisis de los resultados, se procedió a realizar el análisis estadístico en función del tiempo. Se determinaron las medias de degradación para cada tiempo, indicando que el mayor porcentaje de degradación se obtuvo

en las muestras cuya exposición a la cámara UV fue de 9 h, seguido de las muestras expuestas 6 h y finalizando con las muestras expuestas 3 h. Este análisis indicó similitud con los resultados obtenidos anteriormente, ya que las muestras expuestas a 9 h fueron las que mayor porcentaje de degradación tuvieron.

Tabla 9.

Análisis de medias de degradación en función del tiempo con cámara UV.

Tiempo de exposición (h)	N° de muestras	Media	Mínimo	Máximo
3	12	44.417	3.4	88.2
6	12	59.692	5.2	96.0
9	12	60.025	7.2	96.7
Total	36	54.711	3.4	96.7

El análisis ANOVA, indicó que la exposición a los diferentes tiempos no es significativa en el proceso de degradación del colorante, para este estudio, lo cual no concuerda con los resultados obtenidos especialmente entre los tiempos de 3 y 9 h.

Tabla 10.

Análisis ANOVA en función del tiempo con cámara UV.

Parámetro	Significancia	El programa SPSS indica que un parámetro es significativo cuando este es menor a 0.05, caso contrario no tendrá significancia en el estudio.
Tiempo de exposición	.424	

Se consideró como tiempo óptimo de exposición 6 h y no 9 h, esto debido a la pequeña diferencia entre los resultados de ambas, y la optimización de tiempo que representaría las 3 horas de diferencia. Así mismo en el análisis estadístico de comparación de significancias entre los diferentes tiempos de exposición, se indicó que no existen significancias entre ningún tiempo de exposición, contradiciendo así los resultados obtenidos, esto debido a que si bien es cierto

que la diferencia entre los resultados de degradación del tiempo 6 y 9 h no es significativa, la diferencia entre los tiempos 3 y 9 h ya representa una diferencia que se debe considerar, pese a que el programa estadístico no lo analice de esta manera. Además, el programa indica que la diferencia de medias entre los tiempos 3 y 9 h es de 15.6% de degradación, y lo consideró sin significancia, sin embargo, se determinó que el 15.6% de diferencia si es significativo ya que es un porcentaje considerable en un proceso de degradación fotocatalítica.

Tabla 11.

Análisis de significancias entre los tiempos de exposición con cámara UV.

Tiempo de exposición (h)	Tiempo de exposición (h)	Diferencia de medias	Significancia
3	6	-15.2750	.499
	9	-15.6083	.484
6	3	15.2750	.499
	9	-.3333	1.000
9	3	15.6083	.484
	6	.3333	1.000

Una vez analizados los resultados de degradación de colorante en función del tiempo se pudo decir que, a mayor tiempo de exposición de las muestras a la cámara UV, mayor fue la degradación producida del colorante, como se puede evidenciar en la figura 15.

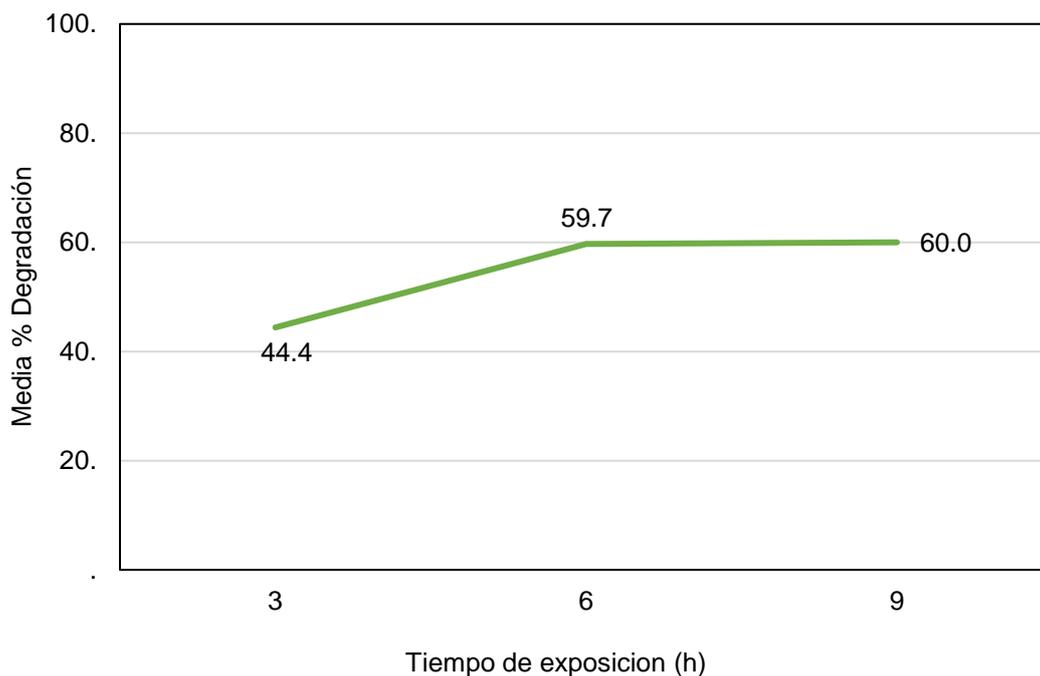


Figura 15. Curva de degradación en función al tiempo de exposición con cámara UV.

A continuación, se procedió a analizar los resultados en función de la concentración empleada de dióxido de titanio, en las muestras expuestas a la cámara UV. Las figuras 16, 17 y 18 nos muestran los resultados cuando la concentración de colorante fue de 10 mg/L, indicándonos la necesidad de la aplicación del TiO_2 para el proceso de degradación del colorante, sin embargo, se determinó que, a mayor concentración del mismo, menor fue el porcentaje de degradación de colorante. Los mejores resultados se obtuvieron con la concentración mínima empleada en la investigación de 2 g/L de TiO_2 .

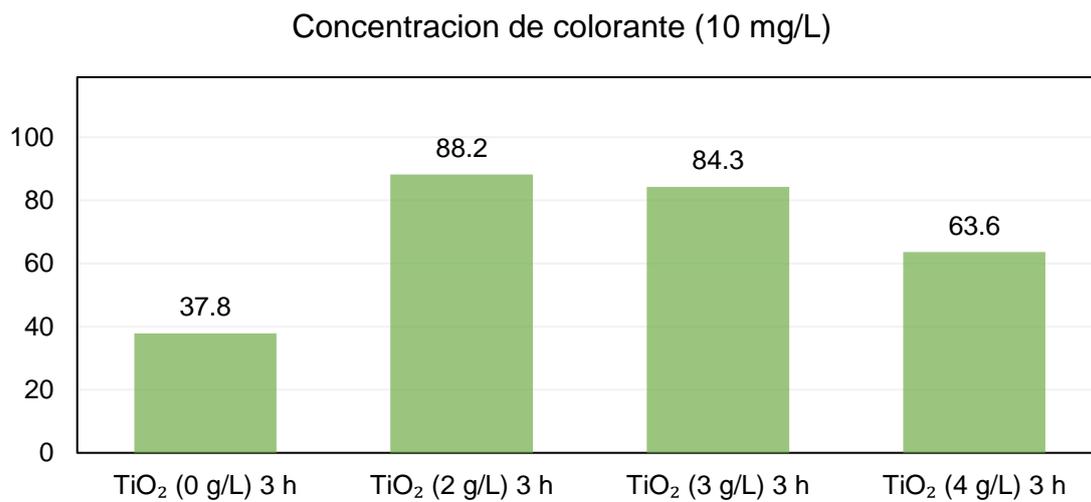


Figura 16. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 3 h).

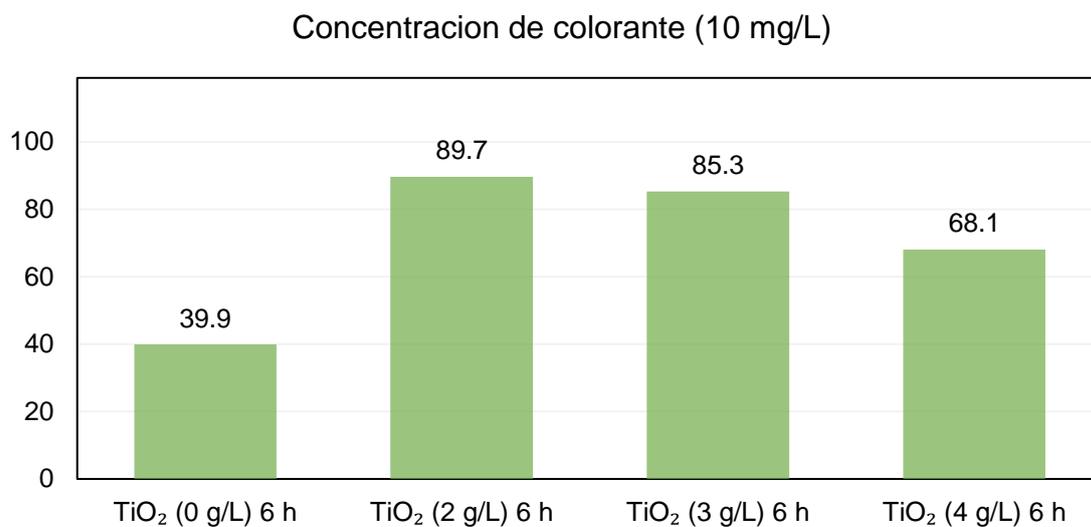


Figura 17. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 6 h).

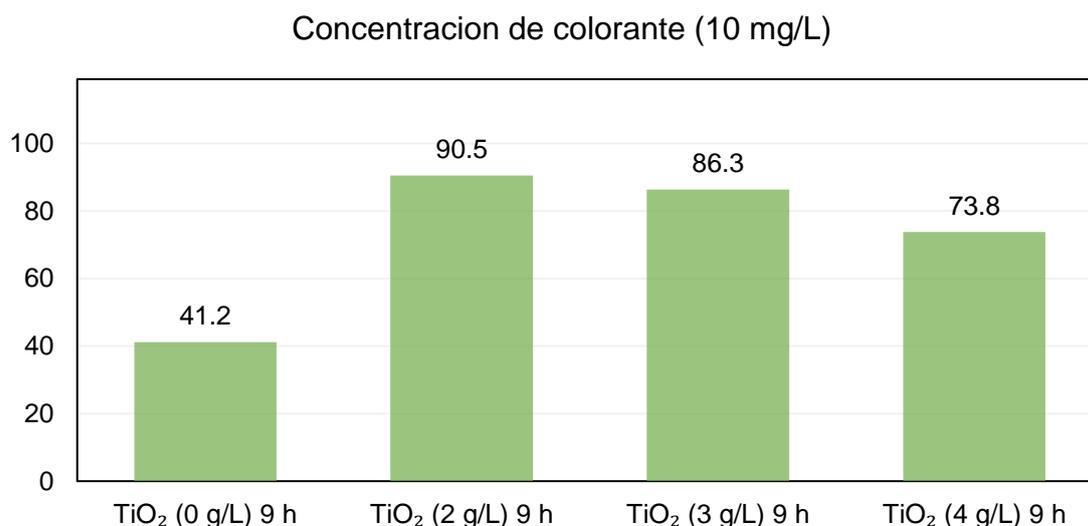


Figura 18. Degradación de colorante (10 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 9 h).

Las figuras 19, 20 y 21 para la concentración de 20 mg/L de colorante, y las figuras 22, 23 y 24 para la concentración de 30 mg/L de colorante, tuvieron la misma tendencia en cuanto a resultados, la cual nos indicó que la concentración necesaria de TiO₂ para llevar a cabo el mejor proceso de degradación es de 2 g/L, y que al incrementar esta, el porcentaje de degradación del colorante disminuirá.

En las muestras tratadas con una concentración de colorante de 20 mg/L se evidenció una mayor cantidad de degradación de colorante con las distintas concentraciones de dióxido de titanio aplicado en comparación con las muestras cuya concentración de colorante fue de 30 mg/L, en donde los porcentajes de degradación fueron comparativamente más bajos.

Las aguas tratadas con concentración de colorante de 20 mg/L y 2 g/L de catalizador fueron las que mejores resultados obtuvieron en todo el estudio, como se muestran en las figuras 19, 20 y 21.

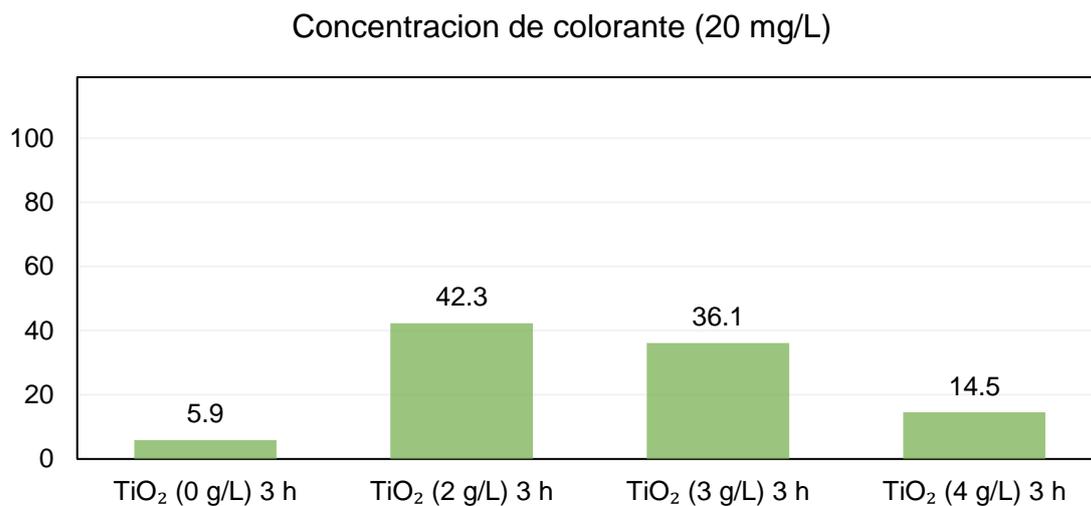


Figura 19. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 3 h).

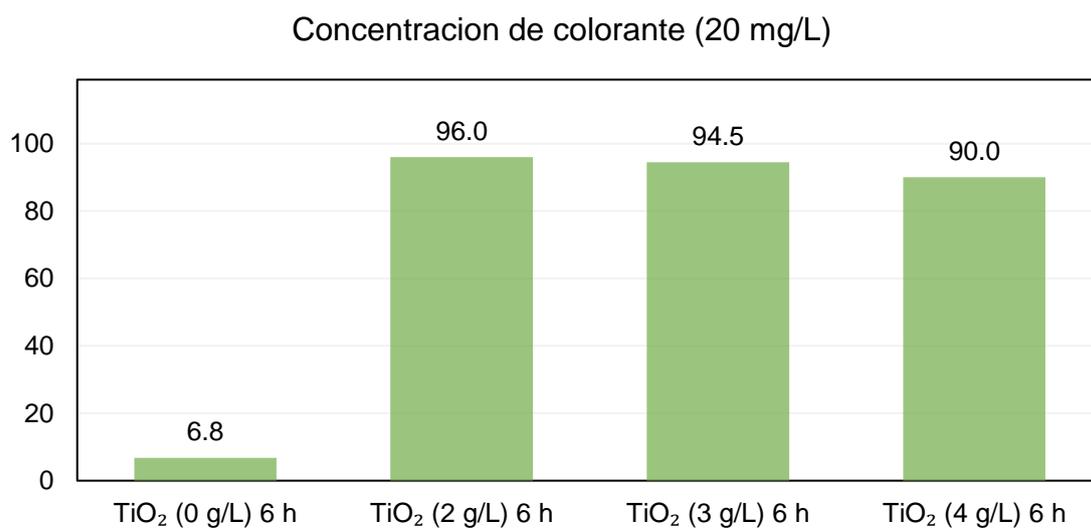


Figura 20. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 6 h).

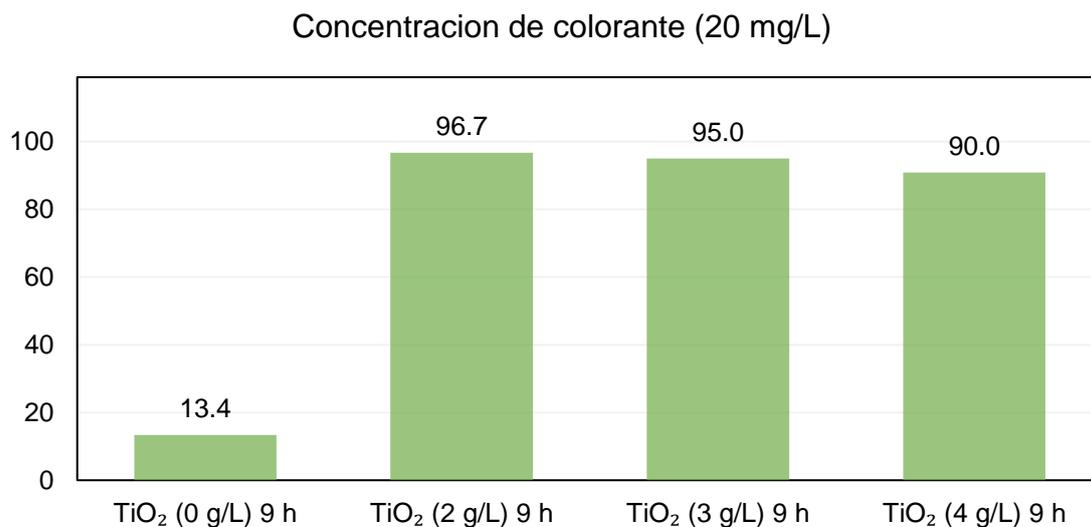


Figura 21. Degradación de colorante (20 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 9 h).

Las aguas tratadas con una concentración de colorante de 30 mg/L tienen una gran diferencia en comparación con las muestras cuya concentración de colorante fue de 20 mg/L, siendo la diferencia en sus mayores porcentajes de degradación del 23%, indicando así mejores resultados de degradación cuando la concentración de colorante fue de 20 mg/L. Los resultados de la concentración de colorante de 30 mg/L se pueden evidenciar en las figuras 22, 23 y 24.

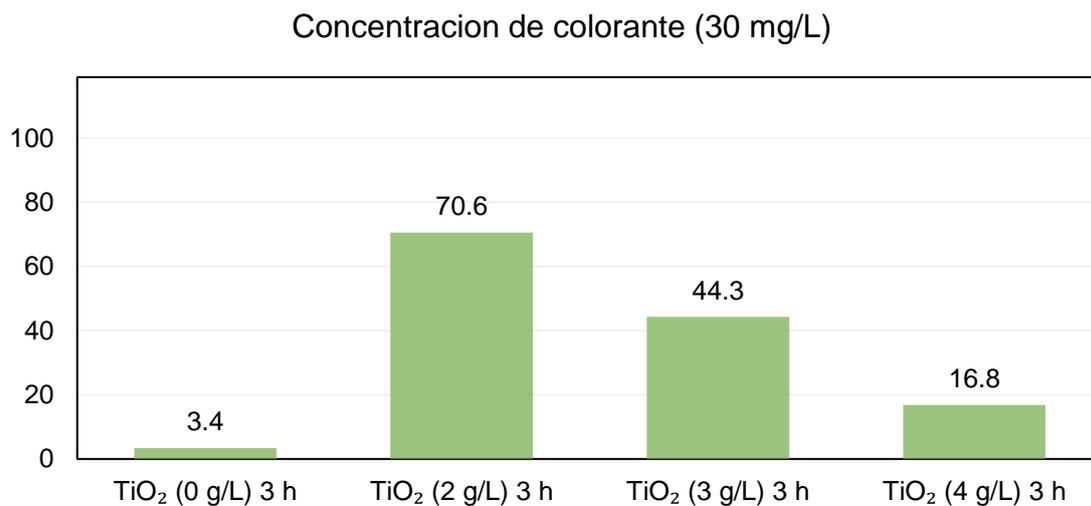


Figura 22. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 3 h).

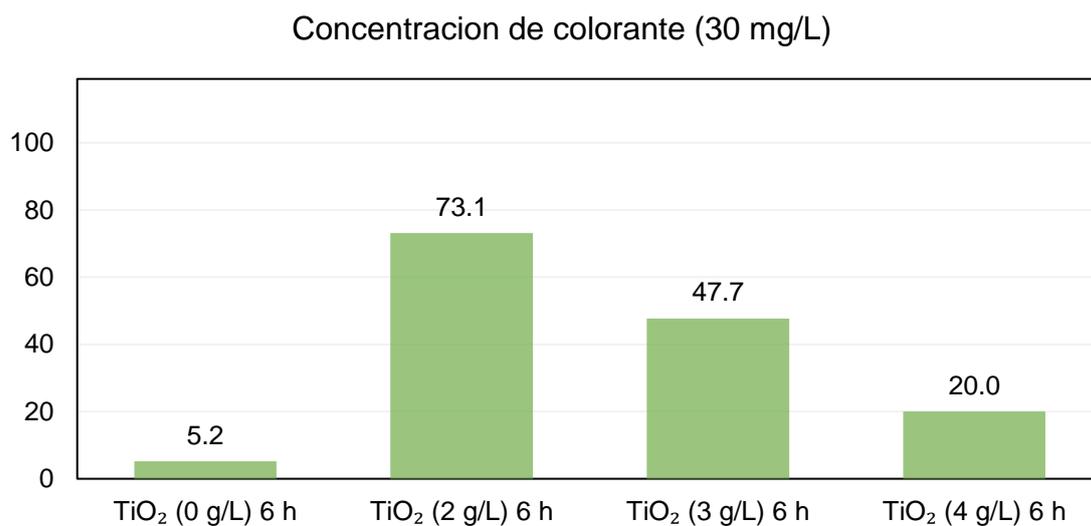


Figura 23. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 6 h).

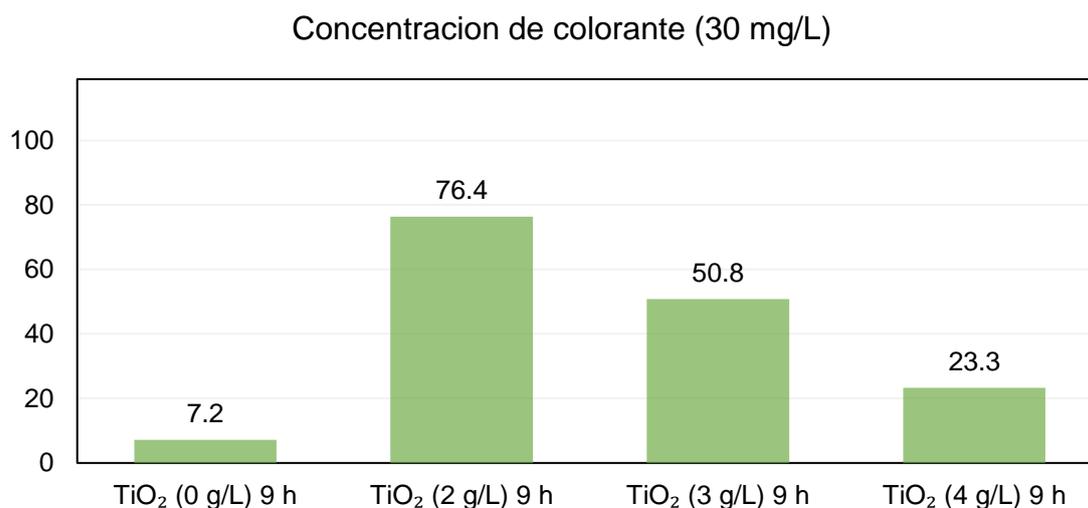


Figura 24. Degradación de colorante (30 mg/L) con cámara UV en función al TiO₂ (Tiempo 9 h).

En la figura 25 podemos observar el total de porcentaje de degradación de las muestras en función a la concentración de dióxido de titanio utilizado. Se comprueba que las muestras cero fueron las que menor porcentaje de degradación tuvieron, sin embargo, debido al efecto térmico causado por la exposición a la radiación UV las muestras cero que estuvieron expuestas al tiempo de 9 h se degradaron más que las expuestas a 3 y 6 h. Las muestras cuya concentración de TiO₂ fue de 2 g/L obtuvieron mayor porcentaje de degradación, siendo las muestras expuestas 9 h las que más porcentaje degradaron, no obstante, el tiempo óptimo de degradación fue de 6 h, debido a lo que representan las 3 horas extras de exposición para la industria. Los mejores resultados estuvieron seguidos por las muestras cuya concentración de TiO₂ fue de 3 y 4 g/L respectivamente.

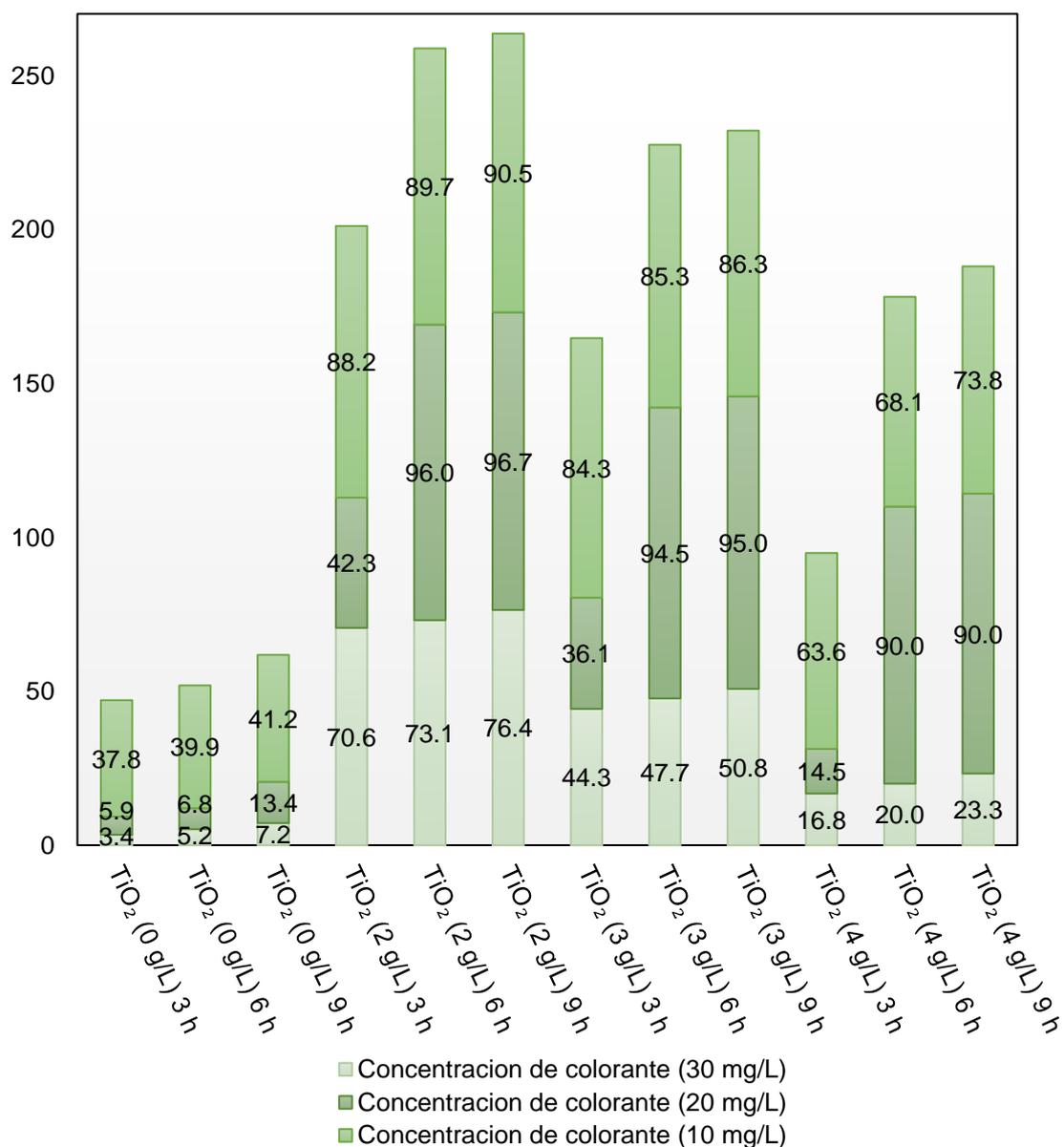


Figura 25. Degradación total de colorante en función al tiempo con la cámara UV.

Para finalizar el análisis estadístico de resultados de las muestras expuestas a la cámara UV, se examinaron los porcentajes de degradación en función de la concentración de dióxido de titanio aplicado. Se determinaron las medias de degradación según la concentración de TiO₂ aplicado, estas indicaron que el mayor porcentaje de degradación se obtuvo en las muestras cuya concentración

fue de 2 g/L, seguido de las muestras de 3 y 4 g/L respectivamente y finalizando con las muestras que se trataron sin el fotocatalizador. Este análisis indicó similitud con los resultados obtenidos en cuanto a cuál concentración de TiO_2 resultó ser más eficiente en el proceso de degradación fotocatalítica de colorante (2 g/L). Los resultados de las medias de degradación según la concentración de TiO_2 se pueden evidenciar en la tabla 12.

Tabla 12.

Análisis de medias de degradación en función del TiO_2 con cámara UV.

Concentración de TiO_2 (g)	N° de muestras	Media	Mínimo	Máximo
.0	9	17.867	3.4	41.2
.2	9	80.389	42.3	96.7
.3	9	69.367	36.1	95.0
.4	9	51.222	14.5	90.9
Total	36	54.711	3.4	96.7

El análisis ANOVA, indicó que la concentración de dióxido de titanio empleada fue significativa en el proceso de degradación del colorante, para este estudio, tal y como se demuestra en la tabla 13.

Tabla 13.

Análisis ANOVA en función del TiO_2 con cámara UV.

Parámetro	Significancia	El programa SPSS indica que un parámetro es significativo cuando este es menor a 0.05, caso contrario no tendrá significancia en el estudio.
Concentración de TiO_2	.000	

Se analizó también con el programa estadístico la significancia que existió entre los resultados con las diferentes concentraciones de dióxido de titanio, en dónde se determinó que, la significancia radicó entre las muestras cero del estudio en comparación con el resto que, si utilizó fotocatalizador, la comparación entre significancias se puede observar en la tabla 14.

Tabla 14.

Análisis de significancias entre las concentraciones de TiO₂ con cámara UV.

Concentración de TiO ₂ (g)	Concentración de TiO ₂ (g)	Diferencia de medias	Significancia
.0	.2	-62.5222*	.000
	.3	-51.5000*	.000
	.4	-33.3556*	.024
.2	.0	62.5222*	.000
	.3	11.0222	.750
	.4	29.1667	.058
.3	.0	51.5000*	.000
	.2	-11.0222	.750
	.4	18.1444	.368
.4	.0	33.3556*	.024
	.2	-29.1667	.058
	.3	-18.1444	.368

Una vez analizados los resultados en cuanto a degradación de colorante en función a la concentración de dióxido de titanio empleado se pudo decir que, es necesario aplicar el fotocatalizador para que se produzca el proceso de degradación, siendo la mejor concentración para este estudio la de 2 g/L, y que al aumentar esta el porcentaje de degradación disminuye, así como se indica en la figura 26 de la curva de degradación según el TiO₂.

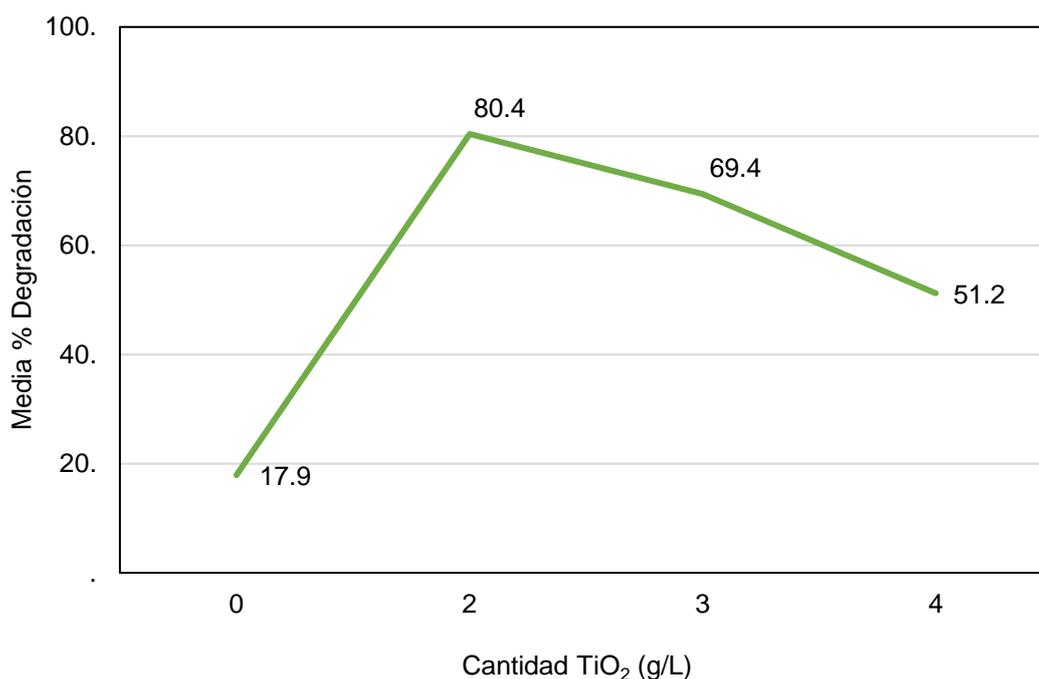


Figura 26. Curva de degradación en función al TiO₂ con cámara UV.

Una vez analizados estadísticamente los resultados de la degradación de colorante por cámara UV, se procedió al análisis estadístico de las muestras tratadas con luz solar. Se eligieron los cinco mejores tratamientos expuestos a la cámara UV, cuyas condiciones resultaron ser las mejores para la degradación del colorante, con el fin de probarlos con exposición a la luz solar. Los resultados de estos variaron en un margen de 10.7% aproximadamente en forma negativa, con respecto a los de la cámara UV.

A pesar del margen desfavorable mencionado anteriormente, la tendencia en cuanto a resultados siguió siendo la misma. Las muestras cuya concentración de TiO₂ fue de 2 g/L obtuvieron mayor porcentaje de degradación que el resto, siendo estos de 85.1% y 85.8% en los tiempos de 6 y 9 h respectivamente; indicando así también que a mayor tiempo de exposición se mantuvo la tendencia de mayor porcentaje de degradación.

Las muestras tratadas con luz solar fueron expuestas en días y horas con condiciones de radiación UV similares como se puede corroborar con la recopilación de datos del INHAMI, la cual indicó que las condiciones climatológicas (radiación), fueron literalmente las mismas, siendo la radiación global promedio de 486 W/m² y la radiación reflejada promedio de 89.8 W/m².

En cuanto al análisis estadístico de las muestras expuestas al sol se obtuvieron resultados similares a los que se expresaron en el análisis estadístico de las muestras expuestas a la cámara UV.

Empezando por el análisis en función del tiempo, las medias fueron muy similares, ya que el total de las muestras estuvieron en un rango de porcentaje de degradación entre 81.1% y 85.8%. De igual manera que en el análisis por cámara UV, se determinó que las muestras que estuvieron expuestas al tiempo de 9 h, tuvieron mejores resultados que las muestras expuestas a 6 h, pero sin representar una diferencia significativa como se observa en la tabla 15.

Tabla 15.

Análisis de medias de degradación en función del tiempo con luz solar.

Tiempo de exposición (h)	N° de muestras	Media	Mínimo	Máximo
6	3	83.067	81.1	85.1
9	2	84.800	83.8	85.8
Total	5	83.760	81.1	85.8

El análisis ANOVA, indicó que el tiempo de exposición para las muestras expuestas a luz solar no fue significativo en el proceso de degradación del colorante, esto debido a los cercanos porcentajes entre los resultados de los tiempos 6 y 9 h, tal y como se demuestra en la tabla 16.

Tabla 16.

Análisis ANOVA en función del tiempo con cámara luz solar.

Parámetro	Significancia	El programa SPSS indica que un parámetro es significativo cuando este es menor a 0.05, caso contrario no tendrá significancia en el estudio.
Tiempo de exposición	.375	

La curva de degradación en función del tiempo con luz solar nos indicó la tendencia que posee la degradación de aumentar cuando el tiempo de exposición aumenta, tal y como se comprueba en la figura 27.

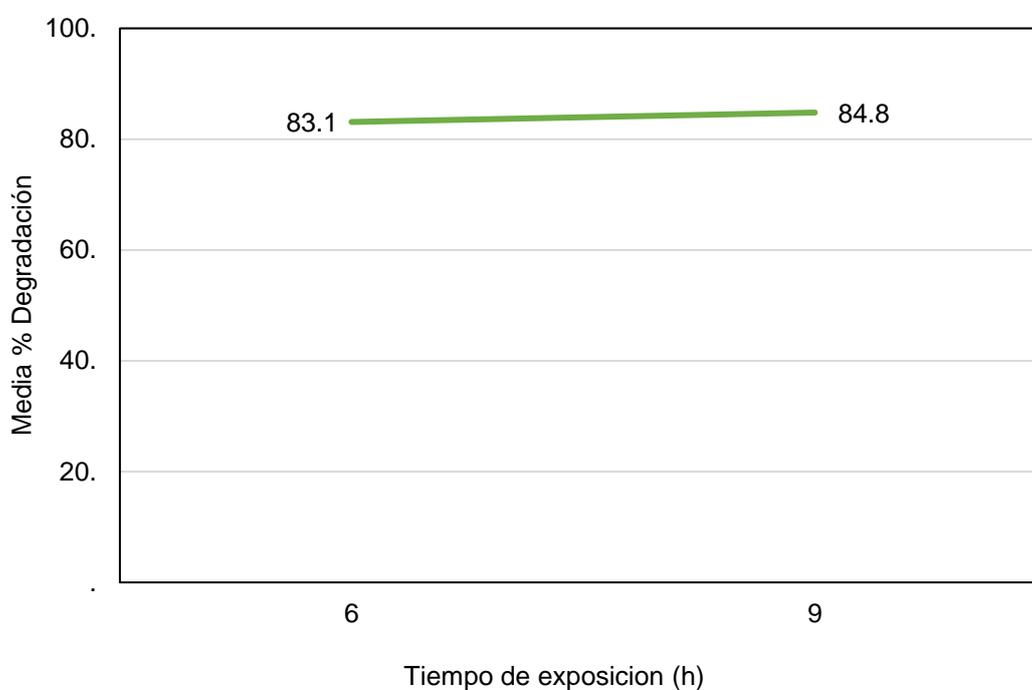


Figura 27. Curva de degradación en función al tiempo con luz solar.

El análisis estadístico en función de la concentración de TiO_2 con luz solar nos indicó a través de las medias que la concentración ideal de dióxido de titanio es de 2 g/L, confirmando así que esta es la concentración necesaria de fotocatalizador que se requiere para degradar la mayor cantidad de colorante.

En la tabla 17 se pueden observar las medias de degradación que se obtuvieron en el análisis con luz solar, con las diferentes concentraciones de TiO₂ utilizadas.

Tabla 17.

Análisis de medias de degradación en función de TiO₂ con luz solar.

Concentración de TiO ₂ (g)	Nº de muestras	Media	Mínimo	Máximo
.2	2	85.450	85.1	85.8
.3	2	83.400	83.0	83.8
.4	1	---	81.1	81.1
Total	5	83.760	81.1	85.8

Por otro lado, el análisis ANOVA indicó que la concentración de TiO₂ si fue significativa en el proceso de degradación del colorante, esto debido a que existe una diferencia de 5% de degradación entre las muestras cuya concentración fue de 2 g/L con respecto a las que utilizaron 4 g/L. A pesar de no ser una diferencia elevada, se debe tomar en cuenta que solo existieron 5 muestras para el estudio de luz solar. El análisis anova en función del fotocatalizador se observa en la siguiente tabla:

Tabla 18.

Análisis ANOVA en función del TiO₂ con cámara luz solar.

Parámetro	Significancia	El programa SPSS indica que un parámetro es significativo cuando este es menor a 0.05, caso contrario no tendrá significancia en el estudio.
Concentración de TiO ₂	.042	

La curva de degradación en función del dióxido de titanio con luz solar, nos dice que a mayor concentración de TiO₂ menor es el porcentaje de degradación de colorante, así mismo confirma que la concentración óptima de este es de 2 g/L, tal y como se comprueba en la figura 28.

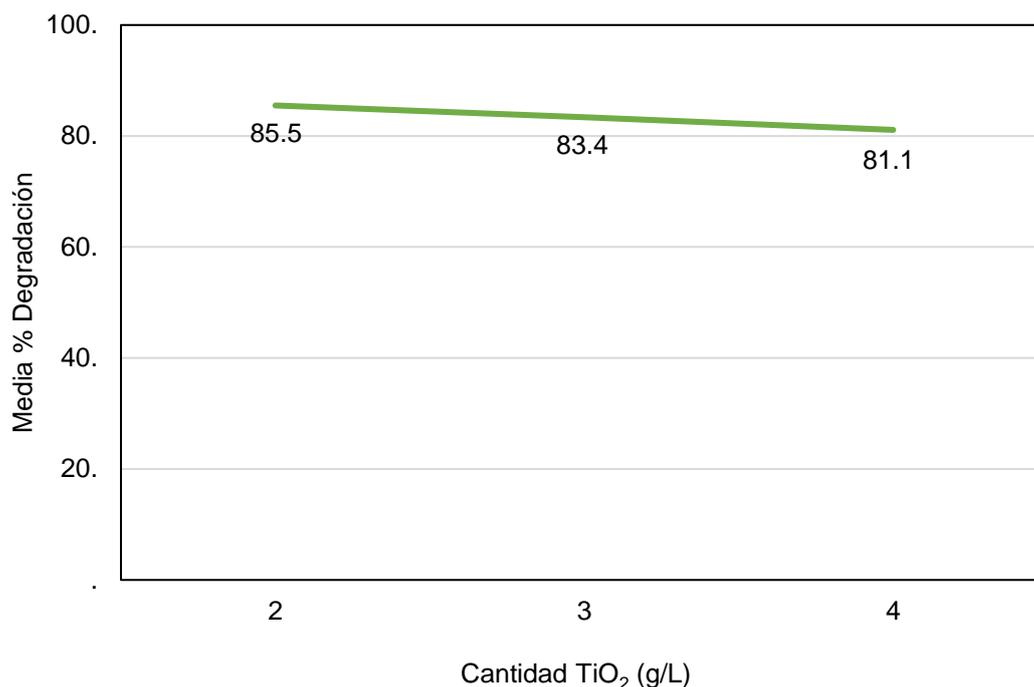


Figura 28. Curva de degradación en función al tiempo con luz solar.

El análisis estadístico de las muestras expuestas a la luz solar nos indicó que el mejor porcentaje de degradación obtenido fue de 85.1% cuando la concentración de TiO₂ fue de 2 g/L y su tiempo de exposición fue de 6 h. Por su parte el mejor resultado de degradación de colorante con exposición a la cámara UV, fue de la misma manera cuando la concentración de TiO₂ fue de 2 g/L y su tiempo de exposición fue de 6 h, siendo este de 96 %. En ambos casos el análisis determinó que, a mayor concentración de dióxido de titanio empleado, menor es el porcentaje de degradación de colorante; y que a mayor tiempo de exposición a la luz UV mayor es el porcentaje de degradación, como se demuestra en la figura 29.

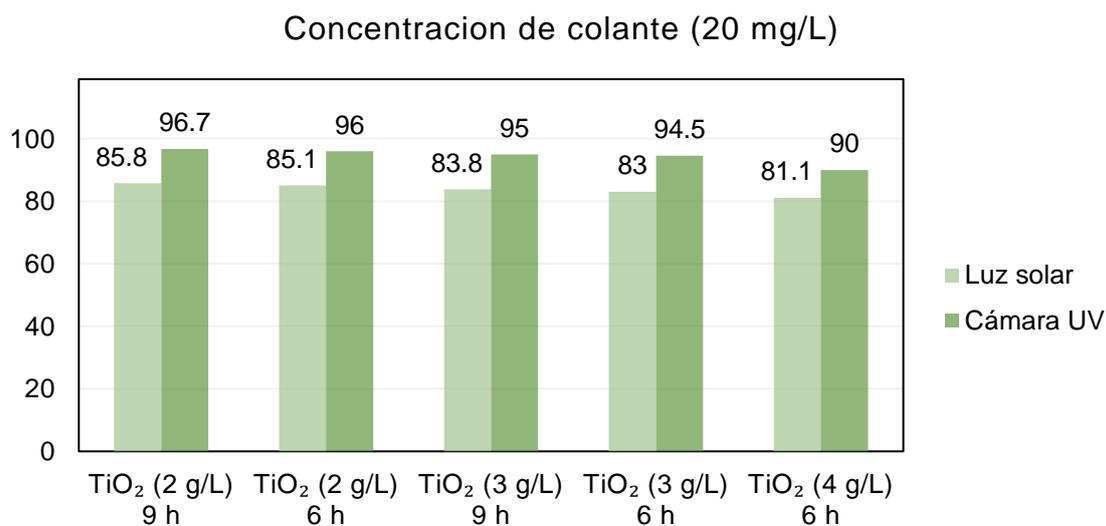


Figura 29. Comparación de resultados de degradación con luz solar y cámara ultravioleta.

Por otra parte, se determinaron los mejores parámetros para la degradación del colorante sintético aplicado, estos fueron: concentración de TiO₂ 2 g/L y tiempo de exposición 6 h, cuando la fuente de exposición fue la cámara UV. Los resultados de degradación se pueden observar en la figura 30.

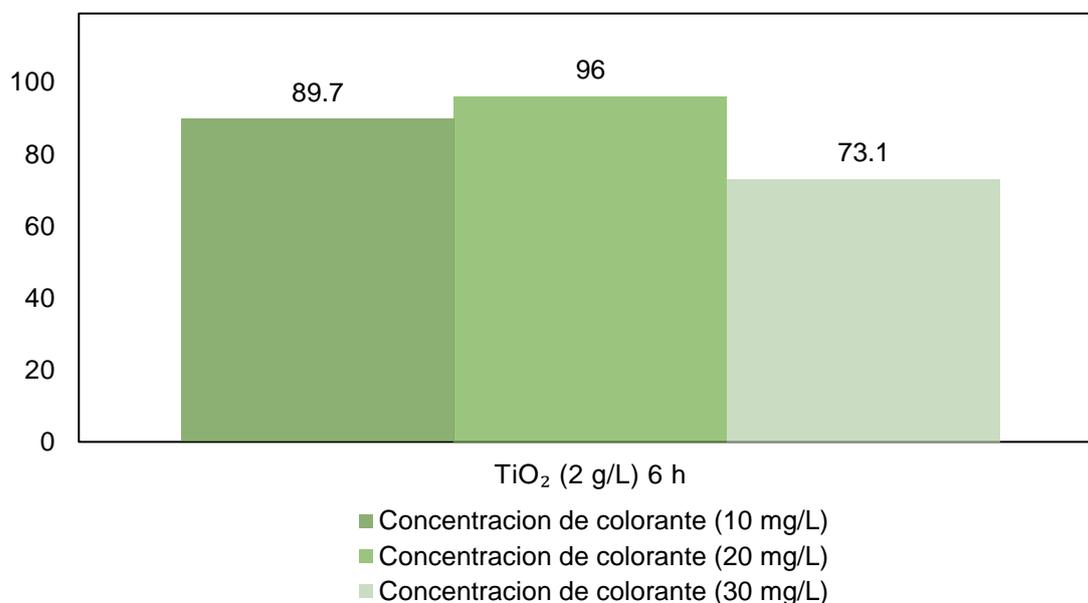


Figura 30. Mejores porcentajes de degradación para cada concentración de colorante.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, el tratamiento por fotocátalisis empleado para el proceso de degradación del colorante sintético rojo drimarén cl-5b, resulto efectivo, ya que se obtuvieron porcentajes de degradación elevados, posibilitando su aplicación para el tratamiento de aguas residuales del proceso de tintura en la industria textil.

El uso de un fotocatalizador (óxido metálico), es importante para acelerar el proceso de degradación de los colorantes, con el fin de generar menores concentraciones del contaminante en el efluente, como se pudo evidenciar en los resultados.

Según los resultados obtenidos, la concentración óptima de fotocatalizador empleada fue de 2 g/L; además se determinó que a mayor concentración de fotocatalizador empleado, menor fue el porcentaje de degradación de las muestras, debido a la saturación que este provoca en las aguas residuales, alterando su turbidez.

El porcentaje de degradación de colorante depende de la concentración presente del mismo en el agua residual y de la concentración de fotocatalizador utilizada en el tratamiento, y en menor medida al tiempo de exposición a luz UV.

El tiempo de exposición a la luz solar, no fue un factor significativo en las muestras cuya exposición fue de 6 y 9 h respectivamente, obteniéndose resultados relativamente similares en cuanto a degradación; no obstante, en los resultados de degradación de colorante en las muestras expuestas 3 y 9 h, si existió una diferencia significativa.

El mejor tiempo de exposición a la radiación UV para este estudio fue de 6 h. Pese a que existieron mejores resultados en las muestras cuya exposición fue de 9 h, la diferencia de degradación obtenida no compensa las 3 h adicionales que serían necesarias aplicar, considerando así que, a partir de las 6 h de exposición a la luz UV, el porcentaje de degradación de colorante se mantiene prácticamente constante.

El sistema de tratamiento por medio de la cámara UV resultó ser más efectivo que el tratamiento en donde se utilizó luz solar, existiendo una diferencia de degradación promedio de 10.7%.

El uso de dióxido de titanio como fotocatalizador es efectivo en el proceso de degradación fotocatalítica del colorante sintético rojo drimarén cl-5b, llegando a degradar hasta el 96.7% de la concentración del mismo.

Según los resultados obtenidos, los métodos de degradación fotocatalítica empleados en el presente estudio (por cámara UV y por luz solar), son efectivos para degradar colorante sintético, cuando la concentración del mismo se encuentra entre 10 a 30 mg/L, rango de concentración de colorante que la industria textil descarga en sus aguas residuales provenientes del proceso de tintura.

5.2 Recomendaciones

Es importante reposar las muestras después del tratamiento para así asegurar la sedimentación del fotocatalizador en su totalidad, o de lo contrario buscar algún tipo de metodología que se aplique y permita sedimentar el dióxido de titanio de una manera más rápida.

Se aconseja tratar las aguas residuales expuestas a la luz solar en días en los cuales las condiciones atmosféricas sean similares, esto con el fin de generar resultados reales en cuanto a la degradación del colorante, cuando estas sean expuestas a la radiación solar en días diferentes.

Es fundamental controlar los tiempos de exposición a la radiación UV de una manera precisa, para evitar inconsistencias en los porcentajes de degradación que provoquen una comparación de resultados equívoca.

Se recomienda realizar al menos 3 repeticiones de cada muestra a tratar para que exista reproducibilidad de resultados y de esta manera asegurar que las mediciones realizadas sean razonables y puedan ser comparadas entre sí, y entre los demás resultados.

Se sugiere socializar los resultados obtenidos en empresas afines o de interés a la investigación con el fin de brindar propuestas alternativas para los procesos de tratamientos de aguas que poseen las industrias textiles, incentivado así a la conciencia ambiental.

Es recomendable buscar métodos de degradación fotocatalíticos semejantes a los de la investigación y comparar resultados con el fin de seleccionar un sistema que permita la mayor cantidad de degradación de los colorantes sintéticos en el menor tiempo posible, de la misma manera es importante realizar estudios con distintos tipos de catalizadores con el propósito de encontrar el óxido metálico más eficiente para este proceso.

Referencias

- Chacón, J., Leal, M., Sánchez, M. y Bandala, E. (2002). TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA INDUSTRIALTEXTIL MEDIANTE FOTOCATÁLISIS SOLAR. Cancún, México. Recuperado el 27 de octubre de 2016 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-009.pdf>
- Corzo, A. y Vega, J. (2012). ESTUDIO CINÉTICO DE LA DEGRADACIÓN FOTOCATALÍTICA OXIDATIVA DE COLORANTES EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA TEXTILERA. Arequipa, Perú. Recuperado el 27 de octubre de 2016 de <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/ABR12/Lucioni.pdf>
- López, V., Amante, B. y Gutiérrez, M. (2010). Estudio de viabilidad de la reutilización de baños de tintura textil. Cataluña, España.
- Garzón, C., Pedroza, A. y Barragán, B. (s.f). SELECCIÓN DE CEPAS FÚNGICAS Y BACTERIANAS CON CAPACIDAD PARA DEGRADAR COLORANTES TEXTILES. México, Ciudad de México. Recuperado el 27 de octubre de 2016 de http://www.informatica.sip.ipn.mx/colmex/congresos/chiapas/cd/Tecnologia_ambiental%5CExtensos%5C837468.pdf
- Rodríguez, S., Fernández, M., Bermúdez, R. y Morris, H. (2003). Tratamiento de efluentes industriales coloreados con *Pleurotus* spp. Santiago de Cuba, Cuba. Recuperado el 27 de octubre de 2016 de <http://www.reviberoammicol.com/2003-20/164168.pdf>
- AITEX. (s.f). Optimización de los niveles de contaminación del agua procedente de los procesos textiles. Alicante, España. Recuperado el 27 de octubre de 2016 de <http://www.detextiles.com/files/CALIDAD%20DEL%20AGUA.pdf>
- Instituto de promoción de exportaciones e inversiones. (2012). Análisis sectorial de textiles y confecciones. Ecuador. Recuperado el 27 de octubre de 2016 de http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/11/PROEC_AS2012_TEXTILES.pdf

- Miranda, E. (s.f). Aguas residuales de la industria textil. México. Recuperado el 27 de octubre de 2016 de http://www.aguasimple.org.mx/revistav4/index.php?option=com_content&view=article&id=272:i-que-podemos-hacer-contr-las-sequias&catid=45:notas-de-agua-v4&Itemid=6
- EMAAP-Q. (2009). Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. Quito, Ecuador.
- PASA. (2016). Cuenca, Ecuador.
- Garcés, L. y Peñuela, G. (2004). Fotocatálisis de aguas residuales de la industria textil utilizando colector solar. Antioquia, Colombia. Recuperado el 7 de noviembre de <http://www.redalyc.org/html/695/69511002/>
- Garcés, L., Mejía, A. y Peñuela, G. (2004). Fotodegradación con TiO₂ del colorante Rojo Amaranto en aguas. Antioquia, Colombia. Recuperado el 7 de noviembre de 2016 de <http://www.redalyc.org/pdf/695/69510202.pdf>
- Pérez, G. (2015). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS. Quito, Ecuador. Recuperado el 7 de noviembre de 2016 de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4518/1/T-UCE-0017-116.pdf>
- Morillo, S. (2012). PROPUESTA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA (P+L) EN EL PROCESO DE TINTURADO, EN LA INDUSTRIA TEXTILES MARÍA BELÉN UBICADA EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. Quito, Ecuador. Recuperado el 7 de noviembre de 2016 de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/662/1/T-UCE-0012-126.pdf>
- Sanz, J., Lombraña, J. y De Luis, A. (2012). Estado del arte en la oxidación avanzada a efluentes industriales: nuevos desarrollos y futuras tendencias. Valencia, España.

- Universidad de Alcalá. (2008). Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas: descripción y funcionamiento. Madrid, España. Recuperado el 21 de noviembre de 2016 de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/01/16/8247>
- Bustamante, I. (2015). APLICACIÓN DE LA OZONIZACIÓN FOTOCATÁLITICA SOLAR PARA LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTE EN EL AGUA EN UNA PLANTA PILOTO. Recuperado el 21 de noviembre de 2016 de <http://myslide.es/documents/aplicacion-de-la-ozonizacion-fotocatalitica-solar-para-la-degradacion-de.html>
- Londoño, E., Yepes, M. y Castro, H. (2001). Decoloración de Aguas de Teñido Textil por Métodos Físicoquímicos y Biológicos. Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Químico. Medellín, Colombia.
- Gil, E., Quintero, L., Rincón, M. y Rivera, D. (2007). Degradación de colorantes de aguas residuales empleando UV/TiO₂/H₂O₂/Fe²⁺. Medellín Colombia.
- Sanz, A. (s.f). La industria de los colorantes y pigmentos. Valladolid, España. Recuperado el 18 de marzo de 2017 de <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-11.php>
- Universidad de Salamanca. (s.f.). Fotocatálisis: Catalizador y soporte. Salamanca, España. Recuperado el 12 de abril de 2017 de http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/curso/uni_08/u8c3s3.htm
- Gonzales, C. (2011). La turbidez. Mayagüez, Puerto Rico. Recuperado el 12 de abril de 2017 de <http://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-859/maguaturbidez.pdf>
- Rodríguez, C. (2007). DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO POR REFLUJO CERRADO Y VOLUMETRIA. Recuperado el 12 de abril de 2017 de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

- Albert, I. (2006). Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. Xalapa, México. Recuperado el 12 de abril de 2017 de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf>
- Segura, L. (2007). Estudio de antecedentes sobre la contaminación hídrica en Colombia. Bogotá, Colombia. Recuperado el 12 de abril de 2017 de <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/estudio%20de%20antecedentes%20sobre%20la%20contaminaci%C3%B3n%20h%C3%ADdrica.pdf>
- García, F. (s.f.). Contaminación visual. Mendoza, Argentina. Recuperado el 12 de abril de 2017 de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/ContamVis.htm>
- Valladares, S. (s.f.). ESPECTOFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN MOLECULAR ULTRAVIOLETAVISIBLE. Depósito de documentos de la FAO. Recuperado el 12 de abril de 2017 de <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab482s/AB482S03.htm>
- Abril, N., Bárcena, A., Fernández, E., Galván, A., Jorrín, J., Peinado, J., Meléndez, F. y Túnez, I. (2006). Espectrometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Córdoba, España. Recuperado el 12 de abril de 2017 de https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETR%C3%8DA.pdf
- Rigola, M. (1990). Tratamiento de aguas industriales: Aguas de procesos y residuales. Barcelona, España. Recuperado el 20 de abril de 2017 de https://books.google.com.ec/books?id=fQcXUq9WFC8C&pg=PA28&dq=turbidez&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=turbidez&f=false
- Moreno, B. (2006). Higiene e inspección de carnes – I. España. Recuperado el 20 de abril de 2017 de https://books.google.com.ec/books?id=aOuMC7Dm59kC&pg=PA576&dq=dqo+definicion&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=dqo%20definicion&f=false

- Universidad Pablo de Olavide. (2015). Espectrofotometría. Sevilla, España. Recuperado el 20 de abril de 2017 de <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/quimbiotec/FQpractica4.pdf>
- Garcés, L., Mejía, E. y Santamaría, J. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Antioquia, Colombia. Recuperado el 23 de mayo de 2017 de <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/195/1/083-92%20La%20fotocat%C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>
- Portela, R. (2008). Eliminación fotocatalítica de H₂S en aire mediante TiO₂ soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A. Galicia, España. Recuperado el 23 de mayo de 2017 de https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=WVPnJ07PbUMC&oi=fnd&pg=PA13&dq=degradacion+fotocatalitica+tio2&ots=8T8QQ1dBuo&sig=hm2zEgKiwaWuoFt_uoquCdaFwME#v=onepage&q&f=false

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
1	Repetición 1	0.350	0.212	39.4
2	Repetición 2	0.350	0.221	36.9
3	Repetición 3	0.350	0.220	37.1

Anexo 19. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
4	Repetición 1	0.350	0.210	40.0
5	Repetición 2	0.350	0.211	39.7
6	Repetición 3	0.350	0.210	40.0

Anexo 3. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
7	Repetición 1	0.350	0.207	40.9
8	Repetición 2	0.350	0.205	41.4
9	Repetición 3	0.350	0.205	41.4

Anexo 4. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
10	Repetición 1	0.350	0.043	87.7
11	Repetición 2	0.350	0.038	89.1
12	Repetición 3	0.350	0.043	87.7

Anexo 5. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
13	Repetición 1	0.350	0.037	89.4
14	Repetición 2	0.350	0.036	89.7
15	Repetición 3	0.350	0.035	90.0

Anexo 6. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
16	Repetición 1	0.350	0.037	89.4
17	Repetición 2	0.350	0.031	91.1
18	Repetición 3	0.350	0.032	90.9

Anexo 7. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
19	Repetición 1	0.350	0.049	86.0
20	Repetición 2	0.350	0.049	86.0
21	Repetición 3	0.350	0.046	86.9

Anexo 8. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
22	Repetición 1	0.350	0.051	85.4
23	Repetición 2	0.350	0.051	85.4
24	Repetición 3	0.350	0.052	85.1

Anexo 9. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
25	Repetición 1	0.350	0.055	84.3
26	Repetición 2	0.350	0.050	85.7
27	Repetición 3	0.350	0.060	82.9

Anexo 10. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
28	Repetición 1	0.350	0.100	71.4
29	Repetición 2	0.350	0.080	77.1
30	Repetición 3	0.350	0.095	72.9

Anexo 11. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
31	Repetición 1	0.350	0.110	68.6
32	Repetición 2	0.350	0.112	68.0
33	Repetición 3	0.350	0.113	67.7

Anexo 12. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 10 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
34	Repetición 1	0.350	0.130	62.9
35	Repetición 2	0.350	0.127	63.7
36	Repetición 3	0.350	0.125	64.3

Anexo 13. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
37	Repetición 1	0.511	0.482	5.7
38	Repetición 2	0.511	0.480	6.1
39	Repetición 3	0.511	0.481	5.9

Anexo 14. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
40	Repetición 1	0.511	0.460	10.0
41	Repetición 2	0.511	0.486	4.9
42	Repetición 3	0.511	0.482	5.7

Anexo 15. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
43	Repetición 1	0.511	0.444	13.1
44	Repetición 2	0.511	0.441	13.7
45	Repetición 3	0.511	0.442	13.5

Anexo 16. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
46	Repetición 1	0.511	0.296	42.1
47	Repetición 2	0.511	0.298	41.7
48	Repetición 3	0.511	0.291	43.1

Anexo 17. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
49	Repetición 1	0.511	0.021	95.9
50	Repetición 2	0.511	0.019	96.3
51	Repetición 3	0.511	0.021	95.9

Anexo 18. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
52	Repetición 1	0.511	0.018	96.5
53	Repetición 2	0.511	0.017	96.7
54	Repetición 3	0.511	0.016	96.9

Anexo 19. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
55	Repetición 1	0.511	0.325	36.4
56	Repetición 2	0.511	0.330	35.4
57	Repetición 3	0.511	0.325	36.4

Anexo 20. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
58	Repetición 1	0.511	0.027	94.7
59	Repetición 2	0.511	0.028	94.5
60	Repetición 3	0.511	0.030	94.1

Anexo 21. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
61	Repetición 1	0.511	0.026	94.9
62	Repetición 2	0.511	0.026	94.9
63	Repetición 3	0.511	0.025	95.1

Anexo 22. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
64	Repetición 1	0.511	0.434	15.1
65	Repetición 2	0.511	0.435	14.9
66	Repetición 3	0.511	0.441	13.7

Anexo 23. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
67	Repetición 1	0.511	0.054	89.4
68	Repetición 2	0.511	0.052	89.8
69	Repetición 3	0.511	0.048	90.6

Anexo 24. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
70	Repetición 1	0.511	0.047	90.8
71	Repetición 2	0.511	0.047	90.8
72	Repetición 3	0.511	0.045	91.2

Anexo 25. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
73	Repetición 1	0.750	0.726	3.2
74	Repetición 2	0.750	0.723	3.6
75	Repetición 3	0.750	0.725	3.3

Anexo 26. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
76	Repetición 1	0.750	0.710	5.3
77	Repetición 2	0.750	0.710	5.3
78	Repetición 3	0.750	0.712	5.1

Anexo 27. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 0 g y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
79	Repetición 1	0.750	0.695	7.3
80	Repetición 2	0.750	0.697	7.1
81	Repetición 3	0.750	0.697	7.1

Anexo 28. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
82	Repetición 1	0.750	0.222	74
83	Repetición 2	0.750	0.220	70.7
84	Repetición 3	0.750	0.220	70.7

Anexo 29. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
85	Repetición 1	0.750	0.201	73.2
86	Repetición 2	0.750	0.202	73.1
87	Repetición 3	0.750	0.203	72.9

Anexo 30. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
88	Repetición 1	0.750	0.179	76.1
89	Repetición 2	0.750	0.177	76.4
90	Repetición 3	0.750	0.176	76.5

Anexo 31. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Repetición 1	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
91	Repetición 2	0.750	0.370	50.7
92	Repetición 3	0.750	0.370	50.7
93	Repetición 1	0.750	0.368	50.9

Anexo 32. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
94	Repetición 1	0.750	0.391	47.9
95	Repetición 2	0.750	0.394	47.5
96	Repetición 3	0.750	0.391	47.9

Anexo 33. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
97	Repetición 1	0.750	0.417	44.4
98	Repetición 2	0.750	0.418	44.3
99	Repetición 3	0.750	0.418	44.3

Anexo 34. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 3 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
100	Repetición 1	0.750	0.577	23.1
101	Repetición 2	0.750	0.575	23.3
102	Repetición 3	0.750	0.574	23.5

Anexo 35. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
103	Repetición 1	0.750	0.598	23
104	Repetición 2	0.750	0.600	20.0
105	Repetición 3	0.750	0.601	19.9

Anexo 36. Resultados de degradación con la cámara UV con las siguientes variables: Colorante 30 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
106	Repetición 1	0.750	0.622	17.1
107	Repetición 2	0.750	0.626	16.5
108	Repetición 3	0.750	0.625	16.7

Anexo 37. Resultados de degradación con luz solar con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
1	Repetición 1	0.511	0.075	85.3
2	Repetición 2	0.511	0.076	85.1
3	Repetición 3	0.511	0.077	84.9

Anexo 38. Resultados de degradación con luz solar con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 2 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
4	Repetición 1	0.511	0.073	85.7
5	Repetición 2	0.511	0.073	85.7
6	Repetición 3	0.511	0.072	85.9

Anexo 39. Resultados de degradación con luz solar con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
7	Repetición 1	0.511	0.090	82.4
8	Repetición 2	0.511	0.085	83.4
9	Repetición 3	0.511	0.085	83.4

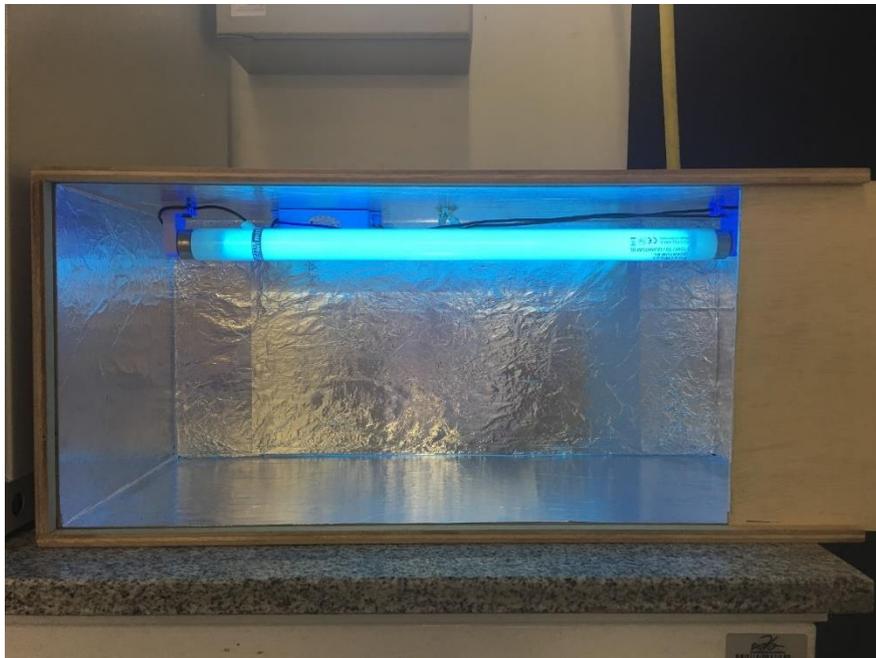
Anexo 40. Resultados de degradación con luz solar con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 3 g/L y exposición 9 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
10	Repetición 1	0.511	0.081	84.1
11	Repetición 2	0.511	0.083	83.8
12	Repetición 3	0.511	0.084	83.6

Anexo 41. Resultados de degradación con luz solar con las siguientes variables: Colorante 20 mg/L, TiO₂ 4 g/L y exposición 6 h.

N° de muestra	Detalle	Absorbancia inicial	Absorbancia final	% Degradación
13	Repetición 1	0.511	0.095	81.4
14	Repetición 2	0.511	0.096	81.2
15	Repetición 3	0.511	0.098	80.8

Anexo 42. Cámara UV.



Anexo 43. Agua residual preparada con concentración de colorante de 10 mg/L de agua.



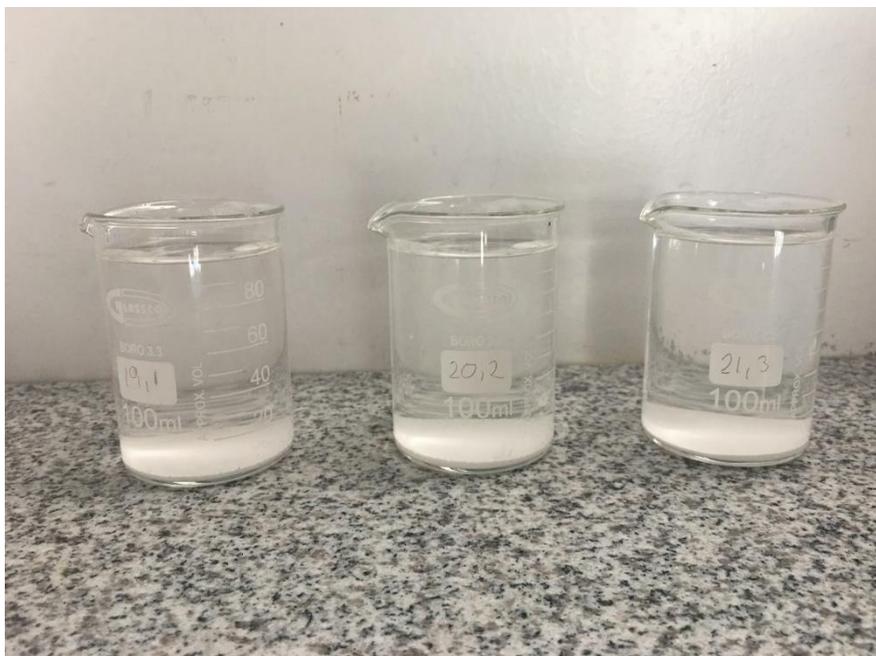
Anexo 44. Agua residual preparada con concentración de colorante de 20 mg/L de agua.



Anexo 45. Agua residual preparada con concentración de colorante de 30 mg/L de agua.



Anexo 46. Agua residual tratada con 96.7% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 2 g/L, 9 h exposición con cámara UV).



Anexo 47. Agua residual tratada con 96% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 2 g/L, 6 h exposición con cámara UV).



Anexo 48. Agua residual tratada con 95% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 3 g/L, 9 h exposición con cámara UV).



Anexo 49. Agua residual tratada con 94.5% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 3 g/L, 6 h exposición con cámara UV).



Anexo 50. Agua residual tratada con 90% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 4 g/L, 6 h exposición con cámara UV).



Anexo 51. Agua residual tratada con 85.8% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 2 g/L, 9 h exposición con luz solar).



Anexo 52. Agua residual tratada con 85.1% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 2 g/L, 6 h exposición con luz solar).



Anexo 53. Agua residual tratada con 83.8% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 3 g/L, 9 h exposición con luz solar).



Anexo 54. Agua residual tratada con 83% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 3 g/L, 6 h exposición con luz solar).



Anexo 55. Agua residual tratada con 81.1% de degradación (Colorante 20 mg/L, TiO_2 4 g/L, 6 h exposición con luz solar).



