

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**DEGRADACIÓN DEL COLORANTE AZUL DE METILENO, MEDIANTE
FOTOCATÁLISIS CON LUZ UV Y TiO_2 , PARA SU APLICACIÓN EN EFLUENTES
DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

Tesis

para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

BENANCIO CORDOVA ESAU EMILIANO

Asesor:

Ing. M.Sc. JOSÉ LUIS PAREDES SALAZAR

Tingo María – Perú

V° B°

Al presente informe de

Sandra L. Zavala Guerrero
Miembro del jurado

2022

V° B°

Al presente informe de Tesis

Lauriano A. Zavaleta De la Cruz
Miembro del jurado



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María – Perú

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°058-2022-FRNR-UNAS

Los que suscriben, miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 23 de marzo de 2022 a horas 06:00 p. m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental:

“DEGRADACIÓN DEL COLORANTE AZUL DE METILENO, MEDIANTE FOTOCATÁLISIS CON LUZ UV Y TiO₂, PARA SU APLICACIÓN EN EFLUENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL”

Presentado por el Bachiller: **BENANCIO CORDOVA, Esau Emiliano**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 16 de noviembre de 2022

Dra. TANIA ELIZABETH GUERRERO VEJARANO
PRESIDENTE

Ing. M.Sc. LAUREANO ZAVALA DE LA CRUZ
MIEMBRO



Ing. M.Sc. SANDRA ZAVALA GUERRERO
MIEMBRO

Ing. M.Sc. JOSE LUIS PAREDES SALAZAR
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**DEGRADACIÓN DEL COLORANTE AZUL DE METILENO, MEDIANTE
FOTOCATÁLISIS CON LUZ UV Y TiO₂, PARA SU APLICACIÓN EN EFLUENTES
DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

Autor : BENANCIO CORDOVA, Esau Emiliano
Asesor : Ing. MSc. José Luis Paredes Salazar
Programa de investigación : Ciencia y Tecnologías Ambientales
Línea de investigación : Tratamiento y/o aprovechamiento de aguas
contaminadas y residuos sólidos
Eje temático de investigación : Tratamiento avanzados de Aguas Residuales
Lugar de ejecución : Universidad Nacional Agraria de la Selva
Duración del trabajo : fecha de inicio: 08/10/2020
Terminó : 08/03/2021
Financiamiento : S/ 2660.00
Propio : Si

Tingo María - Perú

2022

DEDICATORIA

Esta investigación, dedico con todo mi corazón, a mi madre Irene Cordova Padua que me brindo constante apoyo, y forjado en la persona de bien que actualmente soy, asimismo agradezco a mi esposa Yoly Yomira Julca Carmen, que estuvo motivándome para poder cumplir mis metas académicas.

Por otra parte, agradezco a mis maestros de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, que me brindaron conocimiento y formándome para ser parte del bien de una sociedad.

AGRADECIMIENTOS

A la prestigiosa Universidad Nacional Agraria de la Selva, en particular a la Facultad de Recursos Naturales Renovables, escuela profesional de Ingeniería Ambiental y su distinguida plana de docente, por contribuir en mi formación profesional.

A mi asesor, Ing. MSc. José Luis Paredes Salazar, docente de la escuela profesional de Ingeniería Ambiental, por su apoyo, paciencia y orientación profesional que fueron importantes para el desarrollo de la presente investigación.

A los miembros integrantes del jurado calificador, Dra. Tania Elizabeth Guerrero Vejarano, Ing.Msc. Lauriano Zavaleta De La Cruz, Ing.Msc. Sandra Lorena Zavala Guerrero, por las sugerencias brindadas en esta investigación.

A mi familia, que me apoyaron en todo desde el inicio, en especial a mi madre y mis hermanas por su apoyo incondicional que de una u otra manera fueron parte en el desarrollo de la presente investigación, a mis colegas, amigos y compañeros por su apoyo académico y moral en toda la vida universitaria.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCION.....	1
1.1. Objetivos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Antecedentes de la investigación.....	3
2.2. Mecanismo de reacción de la fotocatalisis heterogénea	4
2.3. Proceso de destrucción de contaminantes orgánicos con el catalizador TiO ₂	6
2.4. Catalizadores.....	8
2.4.1. Características de los catalizadores.....	9
2.4.2. TiO ₂ como catalizador inmovilizado	9
2.5. Mecanismo de activación del Dióxido de Titanio	9
2.6. Degradación del azul de metileno.....	10
2.6.1. Mecanismo de degradación del Azul de Metileno.....	10
2.7. Variables que afectan el proceso fotocatalítico	11
2.7.1. Concentración del Oxígeno	11
2.7.2. Efectos del pH.	12
2.8. Aguas residuales de la industria textil	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1. Lugar de ejecución.....	15
3.1.1. Ubicación política y geográfica.....	15
3.1.2. Zona de vida y clima.....	15
3.1.3. Precipitación	16
3.1.4. Vegetación.....	16

3.1.5.	Hidrografía	16
3.1.6.	Actividades económicas.....	16
3.1.7.	Equipamiento urbano.....	17
3.2.	Materiales y Equipos.	17
3.2.1.	Útiles de escritorio	17
3.2.2.	Programas.....	17
3.2.3.	Los materiales y equipos de laboratorio.....	17
3.3.	Reactivos.....	18
3.4.	Metodología	18
3.4.1.	Optimización de la preparación del agua residual artificial del tipo de la industria textil, respecto a los valores de los parámetros fisicoquímicos evaluados: concentración de azul de metileno, pH, conductividad y temperatura.	18
3.4.2.	Aplicación del tratamiento de fotocátalisis al agua residual artificial del tipo de la industria textil a tres concentraciones distintas de azul de metileno, y dióxido de titanio y diferentes tiempos de exposición.....	18
3.4.3.	Determinación de la degradación de azul de metilo a concentraciones de aguas residuales originadas de industriales textiles mediante tratamiento fotocatalítico de luz UV y TiO ₂	19
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1.	Optimización de la preparación del agua residual artificial del tipo de la industria textil, respecto a los valores de los parámetros fisicoquímicos evaluados: concentración de azul de metileno, pH, conductividad y temperatura.	20
4.2.	Aplicación del tratamiento de fotocátalisis al agua residual artificial del tipo de la industria textil a tres concentraciones distintas de azul de metileno, y dióxido de titanio y diferentes tiempos de exposición.....	21

4.3. Determinación de la degradación de azul de metilo a concentraciones de aguas residuales originadas de industriales textiles mediante tratamiento fotocatalítico de luz UV y TiO ₂	22
4.4. Análisis estadístico de los resultados.....	25
V. CONCLUSIONES.....	27
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	28
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	29
VIII. ANEXO.....	33
Anexo I: Absorbancia de los tratamientos.....	33
Anexo II: Panel fotográfico.....	34
Anexo III: Resultado de análisis estadístico.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Características de agua residual industrial textil	14
Tabla 2. Caracterización de las soluciones de azul de metileno.....	20
Tabla 3. Medición de las absorbancias de las soluciones de azul de metileno antes y después del tratamiento	21
Tabla 4.. Eficiencias de los tratamientos aplicados para la degradación del azul de metileno	22
Tabla 5. Medición de las absorbancias de los tratamientos y sus repeticiones en la investigación.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Etapas de desarrollo de fotocatalisis heterogénea con un catalizador de dióxido de titanio.....	4
Figura 2. Cambios en la interfaz semiconductor-electrolito por impacto de iluminación...5	5
Figura 3. Bandas de conducción y de valencia en algunas cuplas redox.7	7
Figura 4. Degradación fotocatalítica de pentaclorofenol, utilizando TiO ₂ en suspensión (200 mg/L) e iluminación solar (CIEMAT).....	11
Figura 5. Degradación del pentaclorofenol por diversos oxidantes.....	12
Figura 6. Influencia del pH en la fotocatalisis del fenantreno.....	13
Figura 7. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.....	15
Figura 8. Degradación de azul de metileno con 0.5% de Dióxido de Titanio.....	23
Figura 9. Degradación de azul de metileno con 1.0% de Dióxido de Titanio.....	24
Figura 10. Degradación de azul de metileno con 1.5% de Dióxido de Titanio.....	25

RESUMEN

El estudio que se presenta, se realizó para determinar la eficiencia fotocatalítica para degradar el colorante azul de metileno en solución acuosa a diferentes concentraciones, diferentes tiempos de tratamiento y diferentes concentraciones de catalizador, para conocer la influencia y relación entre los mencionados factores para su posible aplicación en aguas residuales con colorantes, para esto se prepararon tres soluciones de azul de metileno de 50, 100 y 250 ppm, y se probaron tres porcentajes del catalizador dióxido de titanio a 0.5, 1.0 y 1.5 %, los tiempos de exposición a la lámpara de luz ultravioleta de longitud de onda de 247 nm, fueron de 0.5, 1.0 y 1.5 horas. Para determinar la eficiencia de los tratamientos aplicados, se utilizó como indicador la diferencia de las absorbancias entre las soluciones de azul de metileno antes y después del tratamiento, medidas por espectrofotometría UV-Visible a 520 nm. El mayor porcentaje de degradación de azul de metileno fue de 81.36% y se obtuvo en la solución de 50 ppm de azul de metileno, 1.5% de catalizador dióxido de titanio a un tiempo de tratamiento de 1 hora, de esta manera se pudo concluir que con un tiempo de tratamiento de una hora se obtiene la mayor eficiencia. Estadísticamente, con los coeficientes de correlación de Pearson se determinó que la degradación de AM es directamente proporcional al tiempo de tratamiento en horas y al porcentaje de dióxido de titanio e inversamente proporcional a la concentración de la solución.

Palabras claves: Azul de metileno, dióxido de titanio, degradación, fotocatalisis, luz UV.

ABSTRACT

Degradation of the methylene blue colorant in solution, through the photocatalytic treatment of UV light and TiO_2 , for its application in wastewater of the type of the textile industry.

In the present investigation, the photocatalytic degradation of the methylene blue dye in aqueous solution is determined at different concentrations, different treatment times and different catalyst concentrations, to know the influence and relationship between the aforementioned factors for its possible application in wastewater with colorants. , for this, three solutions of methylene blue of 50, 100 and 250 ppm were prepared, and three percentages of the titanium dioxide catalyst were tested at 0.5, 1.0 and 1.5%, the exposure times to the ultraviolet lamp of length of 247 nm wave, were 0.5, 1.0 and 1.5 hours. To determine the degradation efficiency of the applied treatments, the difference in absorbances between the methylene blue solutions before and after the treatment, measured in a UV-Visible spectrophotometer at a wavelength of 520 nm, was used as an indicator. The highest percentage of degradation of methylene blue was 81.36% and it was obtained in the 50 ppm solution of methylene blue, 1.5% of titanium dioxide catalyst at a treatment time of 1 hour, in this way it could be concluded that with a treatment time of one hour the highest degradation of methylene blue is obtained. The degradation of AM is directly proportional to the treatment time in hours and to the percentage of titanium dioxide and inversely proportional to the concentration of the solution

Keywords: Methylene blue, titanium dioxide, degradation, photocatalysis, UV light.

I. INTRODUCCION

El desarrollo de muchas industrias en la actualidad contribuye continuamente con mejorar la calidad de vida del hombre, sin embargo, estos cambios vienen acompañados del uso de compuestos diversos entre ellos los colorantes, que contaminan el medio ambiente, específicamente el medio acuoso, ya que muchos efluentes industriales tales como los de la industria del papel, los de las industrias textiles, destiladoras, entre otras, cuyos impactos en la vida acuática son drásticos y relevantes. Una de las industrias que se caracteriza por el impacto de sus vertimientos con altas concentraciones de colorantes es la industria textil.

Los estudios realizados para remover los compuestos colorantes disueltos en los efluentes industriales en los últimos años han incrementado, debido al gran deterioro que su presencia significa, desplazándose por tratamientos como la coagulación, adsorción y otros como la el tratamiento fotocatalítico, debido a la ventaja económica que significa el uso de la energía solar aplicada para desestabilizar la estructura química de estos compuestos contaminantes que con la ayuda de catalizadores que influyen en la energía del sistema, se han llegado a obtener muy buenos resultados, por este motivo son muchas las investigaciones realizadas para optimizar esta tecnología fotocatalítica para reducción de contaminantes de diversa naturaleza, entre estos, encontramos a los colorantes como el azul de metileno el cual es muy utilizado en muchas industrias químicas y las probabilidades de encontrarlos disueltos y altas concentraciones en los efluentes son altas.

Según lo descrito en los párrafos anteriores el escenario de la contaminación existente en nuestro país, son producto de las operaciones productivas de las diferentes industrias que vierten estos contaminantes en sus efluentes sin tratamiento o con un insuficiente tratamiento. La aplicación de tecnologías eficientes para remoción de contaminantes recalcitrantes presentes en efluentes, como la fotocatálisis, que generan cambios en la estructura de los contaminantes volviéndolos inocuos, es categorizado como un tratamiento avanzado, idóneo para la remoción de los colorantes.

Este trabajo de investigación se suma a la serie de estudios realizados para corroborar y aportar con sus resultados en la mejor aplicación de la fotocatálisis y se realizó, considerando que aún no es una tecnología muy usada en nuestro país, a pesar de las ventajas en la instalación, operación y mantenimiento que presentan estos denominados Procesos avanzados de Oxidación (PAO).

Ante el conocimiento de esta problemática, se realizó la investigación a partir del siguiente interrogante: ¿Cuál es el porcentaje de degradación del colorante azul de metileno en medio acuoso mediante la incidencia de la luz UV artificial, catalizado por el dióxido de titanio?

Planteándose la siguiente hipótesis: El porcentaje de degradación del colorante azul de metileno en medio acuoso mediante incidencia de la luz UV artificial, catalizado por el dióxido de titanio, supera el 90% en un periodo de tiempo de tratamiento de 1 hora.

1.1. Objetivos

Objetivo General:

Determinar la degradación del colorante azul de metileno en solución, mediante el tratamiento fotocatalítico de luz UV y TiO_2 , para su aplicación en aguas residuales del tipo de la industria textil.

Objetivos específicos

- Optimizar la preparación del agua residual artificial del tipo de la industria textil, respecto a los valores de los parámetros fisicoquímicos evaluados: concentración de azul de metileno, pH, conductividad y temperatura.
- Aplicar un tratamiento de fotocátalisis al agua residual artificial del tipo de la industria textil a tres concentraciones distintas de azul de metileno, y dióxido de titanio y diferentes tiempos de exposición.
- Determinar la degradación de azul de metileno a concentraciones de aguas residuales originadas de industriales textiles mediante tratamiento fotocatalítico de luz UV y TiO_2

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

En un estudio realizado por CHACÓN (2003), quien vio en la optimización de los procesos de oxidación avanzada, todo un reto, centrando su investigación en la mineralización de compuestos colorantes en aguas residuales, mediante un proceso fotofenton, utilizando energía solar, un aspecto resaltante por los resultados obtenidos describe que este proceso de oxidación avanzada son métodos prometedores para eliminar compuestos orgánicos no biodegradables, presentes en aguas residuales.

Los factores cualitativos y cuantitativos que intervienen en el desarrollo del proceso foto-Fenton mencionados en la investigación de CHACÓN (2003), entre estos el uso de peróxido de hidrógeno, sales ferrosas y la energía aplicada como la radiación ultravioleta, radiación visible o una combinación de ambas, son puntos claves en el proceso para la generación de especies altamente enérgicas de bajo costo de obtención y con capacidad de cambiar las estructuras de las especies contaminantes.

GARCÉS *et al.*, (2005) investigaron la aplicación de los procesos de oxidación avanzada en la degradación de Naranja de reactivo 84, como una tecnología para degradar contaminantes en efluentes de la industria textil, y por los resultados obtenidos, llegaron a concluir que esta técnica permite degradar y mineralizar el colorante alcanzando eficiencias considerables.

Otro caso importante que se puede mencionar es el que llevaron a cabo SILVA *et al.* (2005), en la Universidad Agraria de la Molina, quienes mediante un sistema fotocatalítico con radiación UV y el TiO₂, como catalizador, manipularon las variables de operación del sistema y evaluaron su efecto sobre la remoción del azocolorante Azul – 71 de un efluente líquido textil. Para determinar la eficiencia midieron concentraciones residuales utilizando un espectrofotómetro UV- Visible.

Es importante mencionar otros autores cuyas investigaciones se relacionan al objetivo de esta investigación como es el caso de SALAS (2003), quien aporta en el tema con resultados del tratamiento de aguas residuales de la industria textil, mediante coagulación y floculación de material suspendido.

2.2. Mecanismo de reacción de la fotocatalisis heterogénea

Un proceso fotocatalítico global se realiza mediante cuatro etapas como se ilustra en la figura 1, que se puede resumir en la transferencia del reactivo a la superficie del catalizador, la adsorción de los reactivos, reacción en la fase adsorbida, desorción de los productos; todas ellas se desarrollan bajo irradiación.

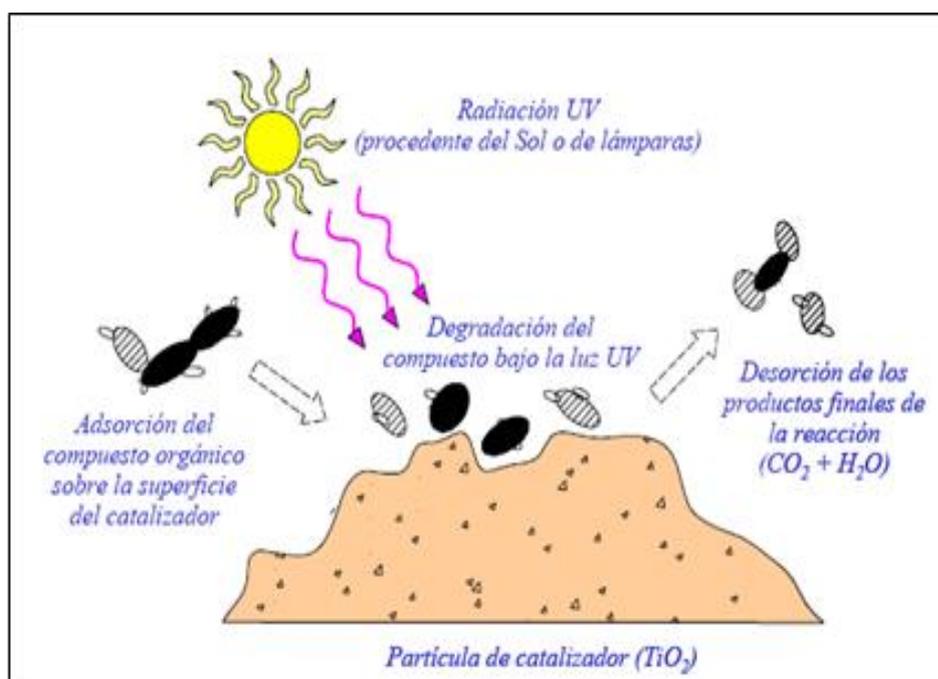


Figura 1. Etapas de desarrollo de fotocatalisis heterogénea con un catalizador de dióxido de titanio. Fuente: MILL *et al.*, (1997).

La fotocatalisis heterogénea, es una tecnología que se desarrolla tomando como base un proceso de catálisis convencional, donde juega un papel importante la influencia del catalizador sobre la energía de activación del proceso, en el caso de la fotocatalisis heterogénea, se trabaja con un catalizador sólido y la energía fotónica (MILLS *et al.*, 1997).

En los procesos químicos que se representan en la figura 1, una partícula de semiconductor es excitada mediante la incidencia de un haz de luz cargada de energía suficiente para generar los pares electrón-hueco, condición necesaria para el desarrollo de este proceso, los cuales presentan una vida media muy corta; estos electrones producto de la excitación deben migrar y reaccionar con las especies adsorbidas en la superficie (MILLS *et al.*, 1997). Hay la posibilidad que algunos de los pares electrón-hueco, no se separen y se genere una recombinación de especies en la superficie o en el interior de la partícula.

En la catálisis podemos diferenciar los componentes que intervienen en la reacción: el agente oxidante y el agente reductor, los cuales en un proceso de oxidación de materia orgánica el O_2 es el agente oxidante y materia orgánica el agente reductor.

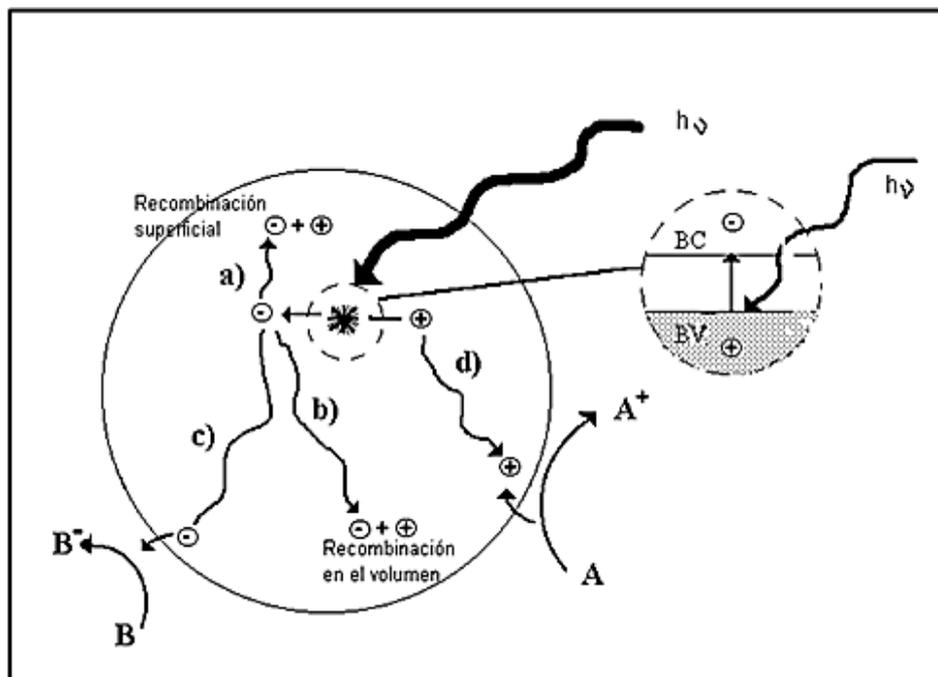


Figura 2. Cambios en la interfaz semiconductor-electrolito por impacto de iluminación.

Fuente: MORRISON (1980)

Usualmente el potencial oxidante de la banda de valencia y la banda de conducción de un semiconductor son de +1 a +3.5 V y de +0.5 a -1.5 V, respectivamente (MORRISON, 1980). Cuando las especies redox son adsorbidas en la partícula de semiconductor y recibe el impacto de la energía por iluminación, se producen en forma simultánea sobre la superficie de un semiconductor las reacciones de oxidación y de reducción.

El rendimiento cuántico por efecto de un fotón absorbido, tomando como referencia la conversión química, es relativamente bajo, sin embargo, se puede notar un rendimiento elevado, considerando la conversión en función del tiempo, en la cual se utiliza la luz solar o iluminación con lámparas (HOFFMANN, *et.al.*, 1995). La generación de los radicales $HO\cdot$ y/o otros radicales, es importante en este proceso; éstos se generan por efecto de los huecos, ya que, ante el proceso de migración a la superficie, se produce la reacción con sustancias adsorbidas, como el agua o con los iones OH^- adsorbidos.

Para su aplicación en soluciones a los problemas ambientales, es necesario, contar con un medio aeróbico, ya que la presencia del oxígeno es indispensable porque actúa

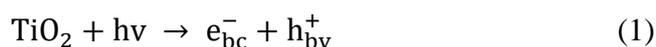
como la principal especie aceptora de electrones, condición que permite dar continuidad al proceso redox. Cabe mencionar, los inconvenientes que generan la presencia de iones metálicos nobles o pesados, ya que los electrones de la banda de conducción reaccionarían con estos iones, reduciéndolos a un estado de oxidación más bajo produciendo la formación óxidos metálicos que precipitan sobre el semiconductor.

Según la información brindada por DOMÈNECH *et al.*, (2004) y resumida en los párrafos anteriores, podemos culminar acorde al autor, quien afirma que la estabilidad del semiconductor utilizado es un punto importante, que influye y limita severamente las opciones de elección de los materiales.

2.3. Proceso de destrucción de contaminantes orgánicos con el catalizador TiO₂

HOFFMANN *et al.*, (1995), aportó con su publicación, para comprender como se produce la destrucción de los contaminantes, la cual tiene como punto de partida la generación del par hueco-electrón y las reacciones que se produzcan en el catalizador en esta condición, donde se puede producir la captura, recombinación o participación en la interfase.

SERPONE y PELIZZETTI, (1989) explican que, “por la absorción de energía impartida por un fotón, un electrón de la banda de valencia es promovido a la banda de conducción (BC), lo que genera un hueco en la primera”:



A consecuencia de la formación de las bandas de valencia y conducción en el semiconductor, las especies intervienen en reacciones redox con diversas especies químicas.

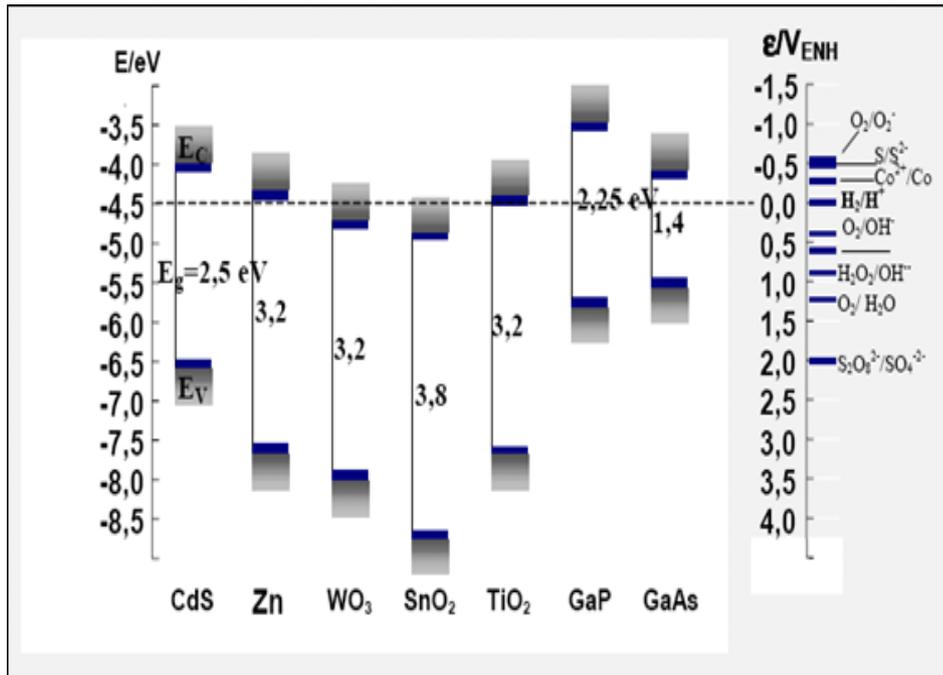
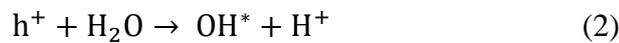


Figura 3. Bandas de conducción y de valencia de algunos semiconductores.
Fuente: HOFFMANN *et al.*, (1995)

La aplicación de un proceso de fotocatalisis en un medio acuoso contaminado tiene factores importantes el oxígeno molecular y otras especies disueltas. “El mecanismo de eliminación de contaminantes es función de la formación de huecos, lugar donde reaccionan las especies adsorbidas, pero la formación de grupos OH• superficiales generan los radicales hidroxilos, que son retenidos en la superficie del catalizador” (HOFFMANN *et al.*, 1995), como podemos observar en las siguientes ecuaciones:



Los radicales hidroxilos presentan un alto potencial de reacción y es una de las especies que actúa destabilizando la estructura de muchas moléculas de tipo orgánico e inorgánico, y el proceso de oxidación continua da como resultado la mineralización completa de las especies contaminantes. Al respecto podemos mencionar a los compuestos orgánicos los cuales se oxidan y forman dióxido de carbono, agua y ácidos inorgánicos. Por otro lado, los electrones posicionados en la banda de conducción se encargan de reducir al O₂ adsorbido formando radical superóxido.

2.4. Catalizadores

Como se mencionó en los párrafos anteriores los materiales que actúan como catalizadores deben tener características específicas entre éstas, llevar a cabo reacciones fotosensibilizadas. DOMÈNECH *et al.* (2004) menciona que:” algunos de estos catalizadores son TiO_2 , ZnO , CdS , óxidos de hierro, WO_3 , ZnS , etc, su uso es una ventaja económica debido a la relativa poca energía que requieren para excitarse, tal es así que pueden utilizar parte de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, lo cual incrementa el interés para un posible aprovechamiento de la luz solar”. Además, los óxidos metálicos son semiconductores de banda ancha, entre ellos se encuentra el TiO_2 , siendo uno de los más utilizados en estos procesos por su estabilidad química, su amplio rango de pH y otras características relacionadas a la absorción de luz en el ultravioleta cercano (UV-A).

“La fotocatalisis heterogénea, ha sido realizada con múltiples semiconductores como Al_2O_3 , ZnO , Fe_2O_3 y TiO_2 , de los cuales resalta el mayor uso del dióxido de titanio, porque presenta una mayor actividad fotocatalítica, es inocuo y a la vez estable en soluciones acuosas” (BUMPUS *et al.*, 1999).

La aplicación de Fotocatalisis Heterogénea en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, ha demostrado gran efectividad sobre la reducción de la carga orgánica total así podemos mencionar su efecto sobre la degradación y mineralización de colorantes, así como del Cromo VI y la oxidación de fenoles, es recomendable seleccionar un fotocatalizador tomando en consideración las características del agua residual a tratar mediante proceso fotocatalisis heterogénea (CANDAL, *et al.*, 2004).

Un fotocatalizador debe reunir las siguientes características: poseer un potencial redox de la banda de conducción positivo para tener el efecto deseado sobre la mineralización de la materia orgánica; la activación debe ocurrir en el rango de la luz visible para aprovechar la luz solar; debe poseer resistencia a la fotocorrosión, su uso no debe representar problemas de toxicidad , y finalmente la catálisis debe reducir el oxígeno (CANDAL, *et al.*, 2004).

2.4.1. Características de los catalizadores

Los fenómenos catalíticos son varios, sin embargo, una de las más importantes clasificaciones son catálisis homogénea y heterogénea.

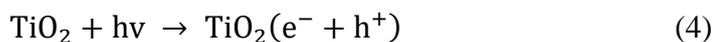
El efecto de los catalizadores sobre una reacción puede incrementar o disminuir la velocidad de una reacción no catalítica, pudiendo considerarse catálisis positiva o catálisis negativa respectivamente. La catálisis heterogénea, es denominada cuando hay diferencia de fases entre catalizador y el medio aplicado, generalmente cuando se utiliza un catalizador sólido. “En el proceso lo que se busca inicialmente es el desplazamiento de la sustancia del seno del líquido a la superficie del sólido, y la velocidad de la difusión de las sustancias reaccionantes hacia las zonas activas del sistema” (HERNÁNDEZ, 1999).

2.4.2. TiO₂ como catalizador inmovilizado

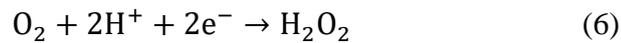
El catalizador TiO₂ es un producto en polvo que presenta ventajas y desventajas, entre las ventajas la gran eficiencia en la eliminación de muchos contaminantes, sin embargo, también tiene desventajas en su separación dado que su uso es ideal en superficie inmovilizadas, de lo contrario será necesario al final del proceso una etapa separación y recuperación del catalizador, su aplicación es crítica en la purificación de gases (CANDAL *et al.*, 2004).

2.5. Mecanismo de activación del Dióxido de Titanio

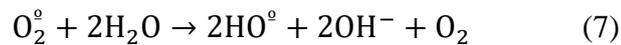
“La activación del catalizador TiO₂, se logra con una longitud de onda inferior a 400 nm, esto permite la formación de la banda de conducción con la subsecuente liberación de un exceso de electrones (e⁻) y de la banda de valencia constituida por la presencia huecos positivos (h⁺)” (GARCÉS, 2003).



La presencia del oxígeno molecular del medio acuoso es muy relevante porque son los precursores de la formación de radicales superóxido y peróxido de hidrógeno, tal como se detalla en la ecuación (5) y (6).



De esta manera el radical superóxido como el peróxido de hidrógeno generan radicales hidroxilos en cadena como se puede observar en las reacciones siguientes:

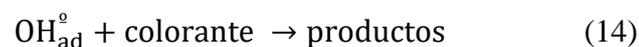
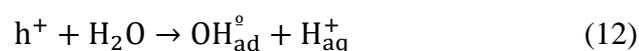


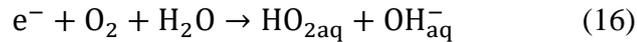
2.6. Degradación del azul de metileno.

El colorante azul de metileno ha sido utilizado en diversos experimentos sistemáticos en los cuales se ha podido probar la reactividad y eficiencia de sistemas de tratamiento fotocatalítico, la razón de su continuo uso en las investigaciones radica en que este posee características que lo hacen un buen compuesto modelo, ya que la presencia o ausencia del color azul facilita la determinación de su concentración por espectrofotometría y por otro lado presenta una idónea resistencia a la degradación por la energía solar cuando no hay participación de un fotocatalizador (GARCÉS,2003).

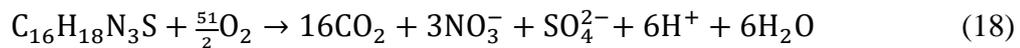
2.6.1. Mecanismo de degradación del Azul de Metileno

Podemos decir que un indicador de la degradación del azul de metileno es la decoloración fotocatalítica, la cual ha sido estudiada por diferentes autores quienes plantean un mecanismo de la degradación de la tinta, como se muestra en las ecuaciones:





La mineralización de todo compuesto se evidencia por la aparición de productos finales de la reacción tales como: el dióxido de carbono, los iones nitrato, amonio y sulfato, al referirnos a la mineralización por fotocatalisis la iluminación del catalizador para la oxidación total de la tinta, se representa en la siguiente ecuación (LACHHEB *et al.*, 2002).



2.7. Variables que afectan el proceso fotocatalítico

2.7.1. Concentración del Oxígeno

La degradación fotocatalítica de sustrato orgánico mejora sustancialmente ante la presencia de oxígeno o de manera alterna el manejo de algunas especies oxidantes de naturaleza orgánica como se observa en la figura 4 y figura 5, los efectos del peroxidisulfato, periodato y peróxidos. “El peróxido de hidrogeno es el agente oxidante más estudiado después del oxígeno y la velocidad del proceso aumenta según sea la presencia en concentración: $O_2 < H_2O_2 < (H_2O_2 + O_2)$ ” (Lachheb *et al.*, 2002)

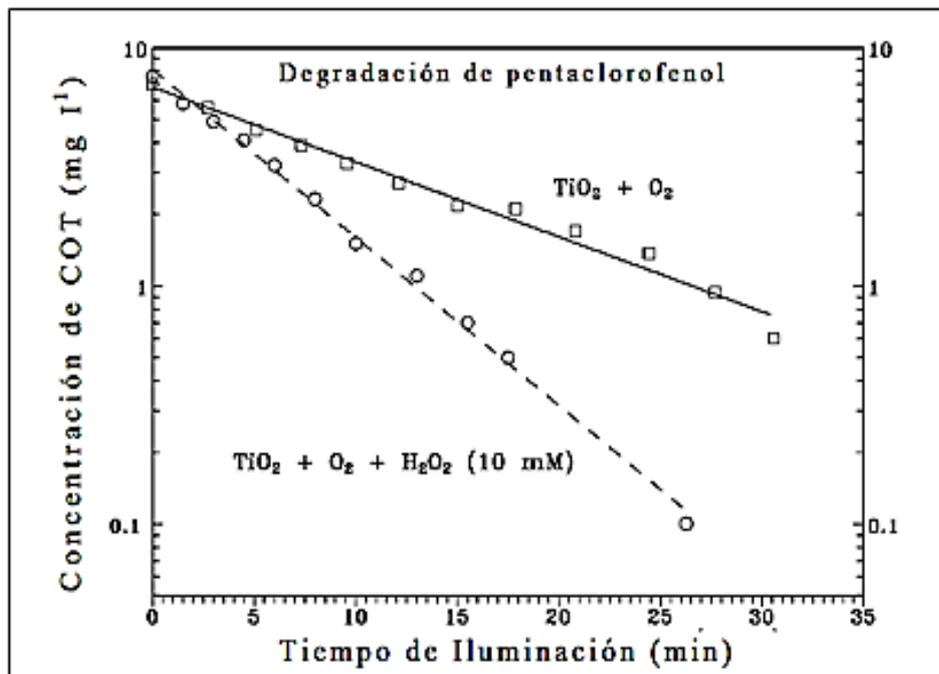


Figura 4. Degradación fotocatalítica utilizando TiO₂ en suspensión (200 mg/L)
Fuente: Lachheb *et al.*, 2002

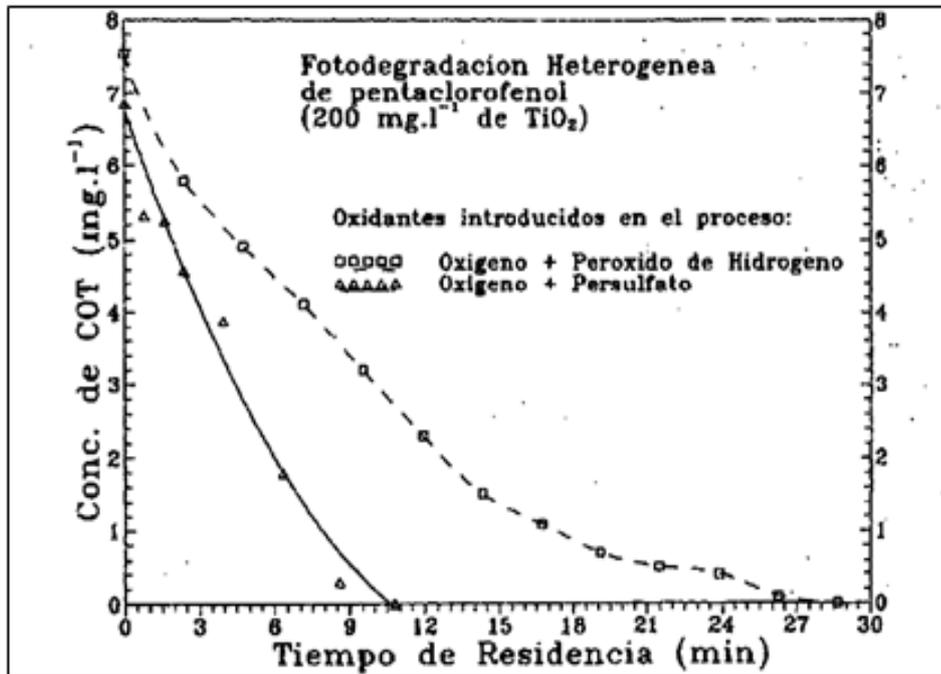


Figura 5. Degradación del pentaclorofenol por diversos oxidantes.
Fuente: Lachheb *et al.*, 2002

LACHHEB *et al.*, (2002), menciona que el efecto del oxígeno molecular radica en su eficiente capacidad para atrapar los electrones de la banda de conducción evitando que se produzca la recombinación hueco-electrón, hecho que evitaría el proceso fotocatalítico.

2.7.2. Efectos del pH.

Las reacciones fotocatalíticas presentan una gran influencia del pH, ya que se sabe que, en algunos rangos de pH, algunos compuestos solubilizados se vuelven insolubles, depositándose sobre la superficie del catalizador y limitando sus efectos de degradación. El punto isoeléctrico para el TiO₂ en agua está cercano a un pH=6. Los valores más bajos de pH, favorecen la formación de cargas positivas en la superficie, sin embargo, los cambios en la velocidad de la actividad fotocatalítica son significativos cuando la diferencia en el cambio de pH es mayor a uno (LACHHEB *et al.*, 2002)

El efecto del pH en la adsorción del sustrato es muy significativo, ya que puede dar las condiciones favorables o desfavorables para el desarrollo de reacciones químicas determinadas.

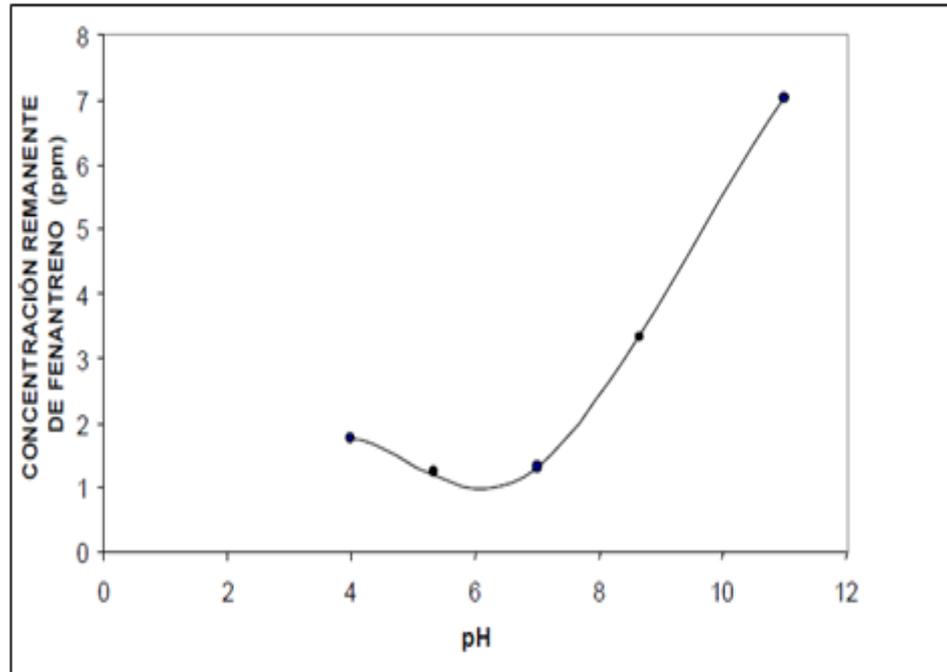


Figura 6. Efecto del pH en la fotocatalisis.

Fuente: Lachheb et al., 2002

LACHHEB *et al.*, (2002) realizó una investigación en fotocatalisis para la degradación de fenantreno, trabajando con 120 min de irradiación en un intervalo de pH entre 4 y 9, reportando una eficiencia de degradación del compuesto de 99.1% a un pH de 4 y una disminución exponencial el valor del pH se incrementaba.

2.8. Aguas residuales de la industria textil

La industria textil, es una actividad antigua, que conforme avanza la tecnología, presenta productos innovadores, esto tiene un impacto positivo en las economías mundiales, ya que genera la apertura de más fábricas y por ende mayor índice de empleo, dado que su fin es cubrir una necesidad básica como es el vestido.

Sin embargo, a este impacto positivo, le acompaña un impacto negativo reflejado por el alto consumo de agua y la utilización de compuestos contaminantes que forman parte de los efluentes de estas industrias textiles.

Los efluentes textiles son considerados altamente tóxicos por los productos químicos que se utilizan sobre todo en el proceso de tinturado, para brindar una amplia gama de colores, solidez y brillo a la prenda, ya que su uso trae consigo la inmersión de metales pesados como el mercurio, el cobre, el arsénico, el plomo, el cadmio, el níquel, el cobalto y el cromo.

A la dificultad en el tratamiento de efluentes de la industria textil, debemos agregar los efectos nocivos sobre la flora y la fauna acuática, si el tratamiento aplicado no es eficiente, los impactos en el medio receptor serán la disminución del oxígeno disuelto, la eutrofización, impedimento del paso de la luz a los cuerpos de agua y su deterioro estético (ALVAREZ, 1999).

En la obtención de colorantes sintéticos, se utilizan muchos derivados del petróleo. Si bien es cierto los efluentes con presencia de colorantes naturales, presentan ventajas respecto a las propiedades físico-químicas que la caracterizan y los contaminantes no ofrecen tanta resistencia a la degradación, como es el caso de los colorantes sintéticos (RED ARGENTINA, 2012).

En la Tabla 1 se presenta las características de agua residual de la industria textil elaborado por ROMERO *et al.*, (2016).

Tabla 1. Características de agua residual de la industria textil

Parámetros Unid. Med.	Valores anuales reales obtenidos de la industria textil en La Habana	
	2000	2002
T° (°C)	45	45
PH	11	9,9
Conductividad (μS/cm)	4,1	4,7
Grasas (mg/L)	14,1	16
BDO (mg/L)	535	1105
DQO (mg/L)	1228	2328

Fuente: Romero *et al.* (2015), datos reales de la industria textil

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), ubicado en las coordenadas UTM: 390256 Este y 8970849 Norte a una altitud de 662 m.s.n.m en la ciudad de Tingo María.

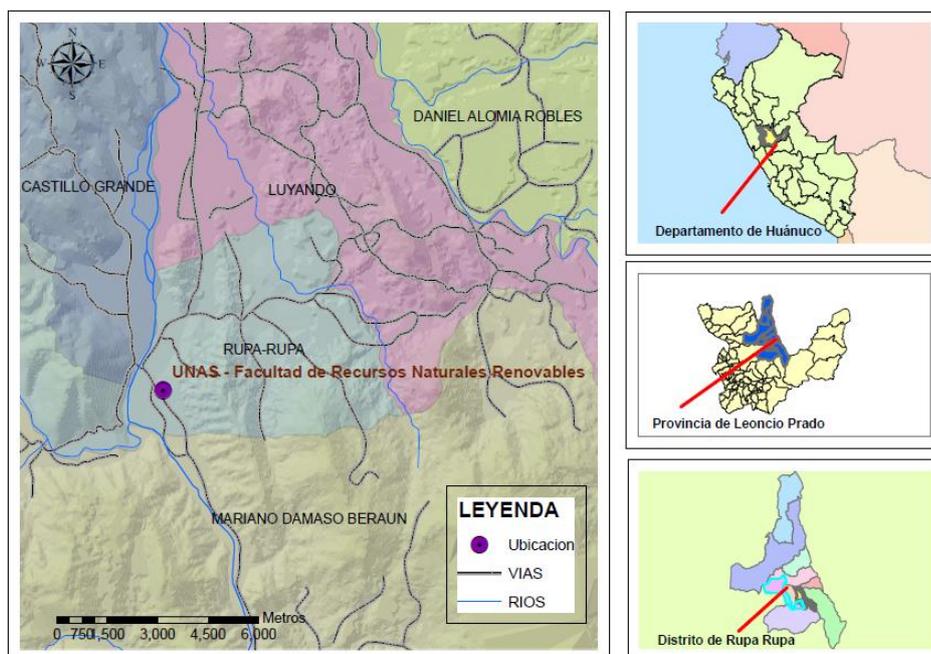


Figura 7. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

3.1.1. Ubicación política y geográfica

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), ubicado en las coordenadas UTM: 390256 Este y 8970849 Norte a una altitud de 662 m.s.n.m en la ciudad de Tingo María.

Políticamente la institución mencionada se encuentra en el distrito Rupa Rupa de la provincia de Leoncio Prado en la región Huánuco, mientras que, al considerar la posición geográfica, dicho laboratorio se ubica en las coordenadas UTM: Este: 390312 y Norte: 8970772.

3.1.2. Zona de vida y clima

Las condiciones climáticas de la zona son: temperatura máxima de 29,4°C, la mínima de 19,2°C, y un promedio de 24,3°C; la precipitación acumulada anualmente es 3300 mm, la humedad relativa es 87,0% y la altitud sobre el nivel del mar es 660 m; considerando los tipos de zonas de vida y el diagrama bioclimático de Holdridge (1971), la

ciudad de Tingo María viene a ser la capital del distrito Rupa Rupa y se ubica en la formación vegetal de bosque muy húmedo Pre montano Tropical (bmh - PT). De acuerdo a las regiones naturales del Perú (Pulgar, 1938) corresponde a la selva alta o Rupa Rupa.

3.1.3. Precipitación

Tingo María la precipitación media anual es de 3042 mm anual, se registran lluvias durante todo el año, cuya intensidad aumenta de octubre a marzo y disminuye de junio a agosto. La menor precipitación registrada se realiza en agosto (112 mm/mes), por el contrario, en el mes de enero se registra el mayor promedio con un valor de 418 mm/mes (Estación Meteorológica José Abelardo Quiñones, 2019).

3.1.4. Vegetación

En términos de ecología, según la clasificación de áreas importantes o composición vegetal de organismos y mapa biológico. Tingo María fue encontrado en el muy húmedo premontano tropical de formación vegetal bmh-PT. Según el área natural del Perú, corresponde a Rupa Rupa o Selva Alta.

3.1.5. Hidrografía

El distrito de Rupa Rupa se encuentra con el río principal que es el Huallaga, seguido de ríos pequeños, riachuelos y quebradas que todos estos desembocan sus afluentes al río principal. El cual cada industria que realiza su disposición final de sus aguas contaminadas, varía la composición normal de los ríos, riachuelos y quebradas mencionados líneas arriba.

3.1.6. Actividades económicas

Los habitantes del distrito de Rupa Rupa, el 40 % se dedican a la agricultura en las zonas rurales y el 60 % se dedican a diversas actividades económicas que trabaja de forma independiente en negocios de los giros económicos en comercios especializados, dentro de ello, el 50% de la población se dedican comercializar prendas de vestir de forma intermediaria en tiendas independientes, boutique, galerías comerciales, puestos de mercados y ambulantes, con la finalidad de satisfacer sus necesidades cotidianas. Por tal razón, son ellos directamente que generan gran demanda para las grandes empresas industriales textileras existentes, en la capital de la ciudad de Lima de nuestro país.

3.1.7. Equipamiento urbano

En el distrito de Rupa Rupa, lugar donde se desarrolló la investigación, respecto a sus equipamientos urbanos, es predominante las tiendas comerciales en diversos tipos de giros de negocios, como son: galerías, tiendas independientes, mercados de abastos. Asimismo, se encuentran instituciones públicas como: municipalidades, fiscalía, SERNANP, Ministerio público, compañía de bomberos, comisaría, instituciones educativas, hospitales, etc. Por otra parte, esta conformadas por iglesias, casas comunales, y otros similares.

3.2. Materiales y Equipos.

3.2.1. Útiles de escritorio

Cuaderno de apuntes, papelotes, cartulinas blancas, papel bond A4, tablero de madera para escribir, cintas de embalaje para rotular las muestras, lapiceros, una laptop Hp para la redacción de los resultados de la investigación y una mesa para fijar el equipo de la lampara de luz UV.

3.2.2. Programas

Se utilizó el software estadístico InfoStat/L, para determinar la correlación de Pearson y Así también se aplicó un Test de Duncan, para análisis de varianza significativa.

3.2.3. Los materiales y equipos de laboratorio

Vasos de precipitación y fiolas; lámpara de luz UV, de una longitud de onda de 247 nm; balanza Analítica marca Ohaus con 0.0001 g de precisión; pH-metro marca Hanna modelo HI98127 precisión +- 0.1 pH; equipo multiparamétrico marca Lamotte, Modelo QW049A precisión: ± 0.01 pH, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%$ escala, $\pm 2\%$ escala, $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y espectrofotometro UV- visible Marca Biotraza Modelo 722 , a una longitud de onda de 512 nm, con sus respectivas especificaciones técnicas: Rango longitud de onda: 325 a 1020 nm, Ancho de banda: 5 nm, Lectura: absorbancia, transmitancia y concentración (método curva estándar), Compartimento para 4 cubetas de 10 mm (cambiador externo), Incluye 4 cubetas de vidrio de paso de luz 10 mm, Detector de fotodiodo de silicio de alta calidad y rejilla de 1200 líneas/mm aseguran una gran exactitud y precisión. Blanco y auto cero fáciles de llevar a cabo, La pulsación de un único botón permite la selección del modo transmitancia, absorbancia y cálculo de concentraciones. Salida para transmisión directa de los datos a un ordenador o impresora. Incluye software

basado en sistema operativo de Windows. Fuente de iluminación: lampara de tungsteno y lampara de deuterio.

3.3. Reactivos

Los reactivos que se utilizaron son los siguientes: Azul de metileno, dióxido de titanio, ácido clorhídrico al 37%, agua destilada, e hidróxido de sodio

3.4. Metodología

3.4.1. Optimización de la preparación del agua residual artificial del tipo de la industria textil, respecto a los valores de los parámetros fisicoquímicos evaluados: concentración de azul de metileno, pH, conductividad y temperatura.

Se prepararon soluciones del colorante azul de metileno a concentraciones de 50, 100 y 250 ppm (mgL^{-1}), con fines de obtener un agua experimental según CAMPOS *et al.*, (2011), con similares características en concentración de colorante y valores de parámetros fisicoquímicos de un efluente de la industria textil. Cabe resaltar que solo se tomó en consideración la concentración de colorante, pH, conductividad y temperatura, para tomarla como punto de partida para la dilución del resto de soluciones que se consideraron en el tratamiento.

Para la medición de los parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura y conductividad, se utilizó el equipo multiparamétrico, el cual fue calibrado según las recomendaciones del fabricante, seguidamente se procedió a introducir la sonda del equipo en cada solución, realizando lavados continuos con agua destilada, después de cada medición, para evitar errores de lectura.

3.4.2. Aplicación del tratamiento de fotocátalisis al agua residual artificial del tipo de la industria textil a tres concentraciones distintas de azul de metileno, y dióxido de titanio y diferentes tiempos de exposición.

Con materiales disponibles en el Laboratorio de Calidad del Agua, se implementó un sistema para exposición del agua experimental en los diferentes tratamientos bajo el siguiente procedimiento:

- En una mesa de 1,20 m de alto se fijó una cámara de madera provista internamente de una lámpara UV de 247 nm de longitud de onda.

- En 4 vasos de precipitación de 500 ml, se colocaron las soluciones experimentales de azul de metileno a 50, 100 y 250 mg/L, con 0,5 %, 1.0 % y 1.5% del peso de la solución, para cada concentración de las soluciones se sometieron a exposición por 30 min, 1 h y 1,5 h, para cada tratamiento. En cada prueba se consideró un testigo.
- Después de cada tratamiento, se obtuvieron muestras en frascos de vidrio, esterilizados, para la lectura en un espectro fotómetro UV-visible

3.4.3. Determinación de la degradación de azul de metilo a concentraciones de aguas residuales originadas de industriales textiles mediante tratamiento fotocatalítico de luz UV y TiO₂.

Las muestras tomadas fueron llevadas al Laboratorio de Microbiología de la UNAS, para la lectura de la absorbancia en el espectrofotómetro UV-visible, a una longitud de onda de 520 nm, y la construcción de una curva de calibración, para determinación del porcentaje de degradación del azul de metileno.

Para determinar el porcentaje de eficiencia de degradación del azul de metileno se utilizó la siguiente fórmula:

$$\frac{(\text{Conc. inicial de azul de metileno} - \text{Conc. final de azul de metileno}) \times 100}{\text{Conc. Inicial de azul de metileno}}$$

Para la medición de datos experimentales se procedió a la preparación del equipo, para su adecuado funcionamiento y se efectuaron las mediciones de las soluciones en el espectrofotómetro de la siguiente manera:

- Se inició calibrando el espectrofotómetro, utilizando un blanco con agua destilada.
- Se procedió a llenar las cubetas del espectrofotómetro, completamente limpias, hasta llenar 3/4 del volumen de cada cubeta con las muestras a leer.
- Seguidamente se procedieron a colocar cada cubeta con las muestras y se cerró la cubierta del equipo.
- Se verificó y registró el valor de la absorbancia de cada muestra.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Optimización de la preparación del agua residual artificial del tipo de la industria textil, respecto a los valores de los parámetros fisicoquímicos evaluados: concentración de azul de metileno, pH, conductividad y temperatura.

Tabla 2. Caracterización de las soluciones de azul de metileno

Concentración (mg/L)	pH	Conductividad (μ S/cm)	Temperatura (° C)	Absorbancia a 520 nm
50	7.2	2690	26	0.104
100	7.8	5320	27	0.212
250	7.9	13549	26	0.523

En la Tabla 2 se observa un comportamiento lineal entre las variables concentración, pH, Conductividad y Absorbancia. Estas variables fueron medidas después a las soluciones de azul de metileno preparadas para posteriormente aplicarle el tratamiento fotocatalítico, previa adición del catalizador dióxido de titanio a diferentes concentraciones.

De acuerdo con ROMERO *et al.*, (2016), las aguas residuales textiles presentan un pH básico y una conductividad promedio de 4.4 μ S/cm. Sin embargo, en el presente trabajo, la conductividad muy superior, es probable que la conductividad fue influenciada por la presencia del semiconductor TiO₂.

4.2. Aplicación del tratamiento de fotocátalisis al agua residual artificial del tipo de la industria textil a tres concentraciones distintas de azul de metileno, y dióxido de titanio y diferentes tiempos de exposición.

Tabla 3. Medición de las absorbancias de las soluciones de azul de metileno antes y después del tratamiento

Tratamientos		Absorbancia a 520 nm de las soluciones de Azul de Metileno (AM) antes y después del tratamiento fotocatalítico								
		0.5% TiO ₂			1% TiO ₂			1.5% TiO ₂		
		50 ppm	100ppm	250 ppm	50 ppm	100pp	250 ppm	50 ppm	100ppm	250 ppm
		AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM
T1= 0.5h	Inicial	0.122	0.256	0.946	0.346	0.564	0.986	0.456	0.755	0.992
	final	0.106	0.244	0.931	0.304	0.404	0.628	0.214	0.186	0.757
T2= 1 h	Inicial	0.122	0.256	0.946	0.346	0.564	0.986	0.456	0.755	0.992
	Final	0.112	0.192	0.846	0.112	0.225	0.895	0.085	0.227	0.927
T3 = 1.5	Inicial	0.122	0.256	0.946	0.346	0.564	0.986	0.456	0.755	0.992
	Final	0.114	0.186	0.934	0.309	0.126	0.952	0.117	0.308	0.987

La degradación de contaminantes orgánicos es de suma importancia para el tratamiento de efluentes. En este sentido, la fotocatalisis con TiO₂/UV funciona y resulta ser bastante interesante porque la degradación se da a través de proceso de oxidación avanzada (PAO) y mediante ellos se puede llegar a la casi total mineralización de los contenidos contaminantes de un medio acuoso, gracias a las propiedades del radical OH• (CLAVIJO, 2013). En la Tabla 3 se muestra las diferentes absorbancias de los diferentes tratamientos, a partir de ellos se conoce el porcentaje de degradación del azul de metileno con las diferentes combinaciones que se realiza el TiO₂/UV como detalla CLAVIJO (2013).

4.3. Determinación de la degradación de azul de metilo a concentraciones de aguas residuales originadas de industriales textiles mediante tratamiento fotocatalítico de luz UV y TiO₂.

Tabla 4. Eficiencias de los tratamientos aplicados para la degradación del azul de metileno

Tratamientos	Porcentaje de Degradación de Azul de Metileno (AM) con UV a 247 nm								
	0.5% TiO ₂			1% TiO ₂			1.5% TiO ₂		
	50 ppm AM	100ppm AM	250 ppm AM	50 ppm AM	100ppm AM	250 ppm AM	50 ppm AM	100ppm AM	250 ppm AM
t=0.5 h	13.38	4.81	1.58	12.042	28.428	36.34	53.07	75.40	23.69
t=1.0 h	8.19	25.00	10.57	67.72	60.10	9.22	81.36	69.89	6.55
t=1.5h	6.83	27.47	1.270	10.60	77.66	3.45	74.34	59.25	0.50

En la investigación se pudo comprobar que la mayor degradación del colorante azul de metileno fue de 81.36% y se produjo cuando el tiempo de tratamiento fue de 1 hora, la concentración de azul de metileno de 50 ppm y 1.5% de dióxido de titanio, esto puede indicar que en el periodo de una hora se produce la suficiente formación de radicales hidroxilos, por efecto combinado de la luz UV y su impacto sobre el catalizador. Estos resultados contrastan con la investigación de LACHHEB *et al.*, (2002), ya que ellos reportaron que la degradación y mineralización total de soluciones acuosas de azul de metileno entre 5 y 30 ppm, rojo congo, alizarin S, naranja G, y rojo de metilo empleando 0.5 g l^{-1} de TiO_2 Degussa P25 como fotocatalizador y luz ultravioleta. La mineralización (CO_2) total del azul de metileno se obtuvo en 6 horas de iluminación con luz UV. La degradación del 88% de una solución acuosa con 340 mg l^{-1} del colorante naranja reactivo 84, se obtuvo con 40 mg l^{-1} de TiO_2 , 2 ml de H_2O_2 en 8 horas de iluminación solar (GARCÉS Y PEÑUELA, 2005).

Los valores de pH (Tabla 3) de las soluciones de 100 y 250 ppm de azul de metileno son los más altos, por tanto, se esperaba que sea una ventaja para la degradación por la formación de radical hidroxilo, sin embargo, no se observó este efecto tal como se aprecia en la Tabla 4. Ya que, según GUO *et al.*, (2011) “a pH básico, las principales especies oxidantes son los radicales hidroxilos, los huecos positivos son las mayores especies oxidantes si el pH del sistema es ácido”.

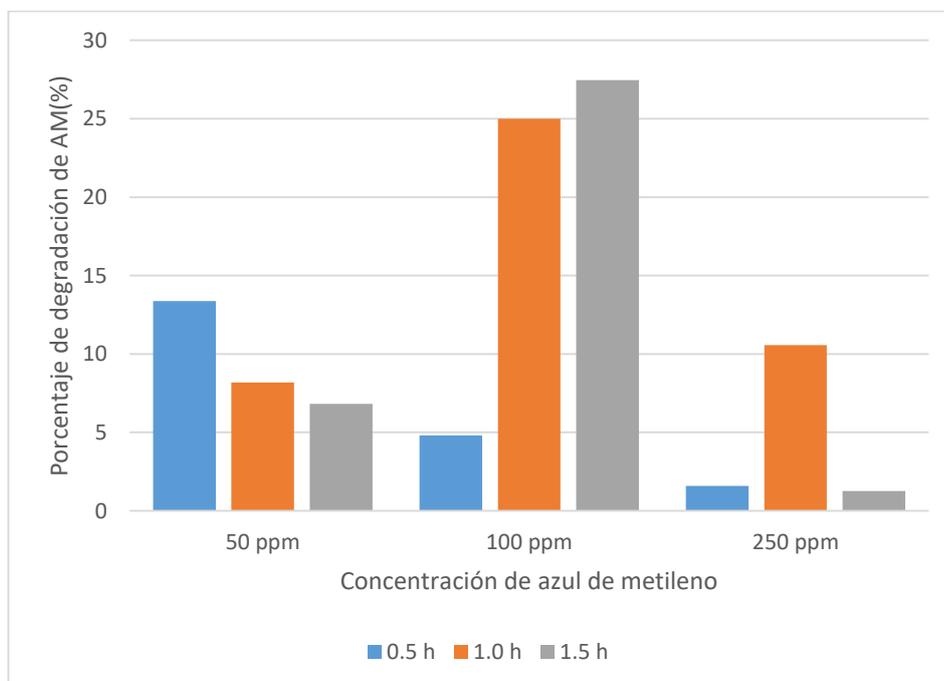


Figura 8. Degradación de azul de metileno con 0.5% de Dióxido de Titanio

En la Figura 9, se puede observar que el porcentaje más alto de degradación de azul de metileno se produce con un tiempo de 1.5 horas, cuando la concentración de azul de metileno es 100 ppm y 0.5% de dióxido de titanio.

En la Figura 9 y 10 se muestra la más alta degradación de azul de metileno se produce cuando la concentración es de 100ppm, este efecto se observó en las soluciones de 0.5 y 1.0 % de dióxido de titanio, esto podría explicarse por la proporcionalidad de radicales hidroxilos formados con la ventaja de un pH de 7.8 y la concentración del colorante. Cuando el dióxido de titanio fue de 1.5%, la más alta degradación se produce con una concentración de 50 ppm, por la posibilidad del exceso de radicales hidroxilos formados.

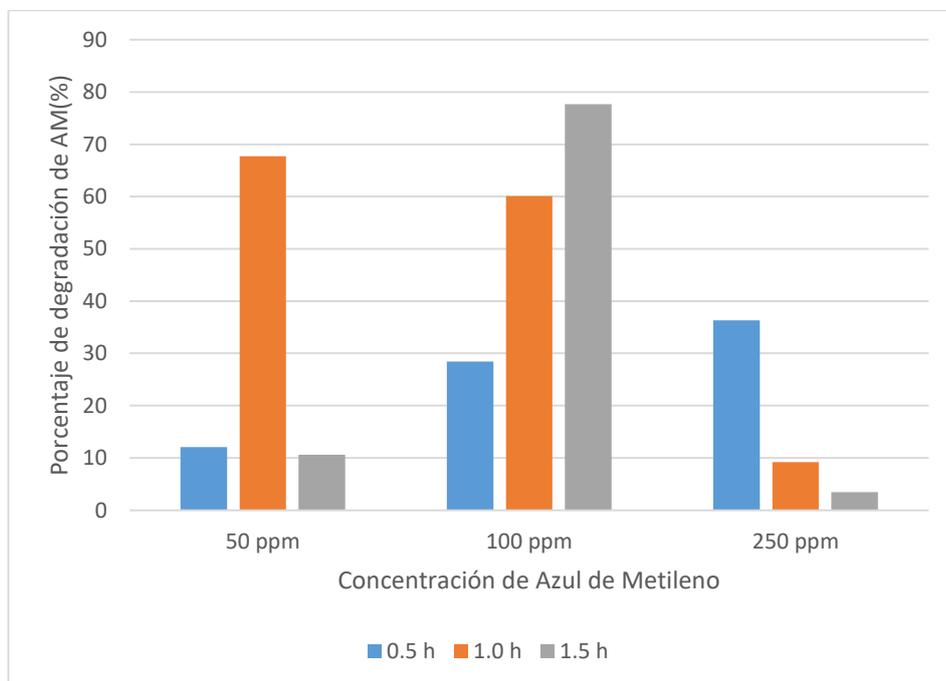


Figura 9. Degradación de azul de metileno con 1.0% de dióxido de titanio

En la Figura 10, se puede observar que el porcentaje más alto de degradación de azul de metileno se produce con un tiempo de 1.0 horas cuando la concentración de azul de metileno es 50 ppm y 1.5% de dióxido de titanio. Así también se observa que el porcentaje de degradación más bajo se produce cuando la concentración de azul de metileno es 250 ppm y el tiempo de tratamiento 1.5 horas.

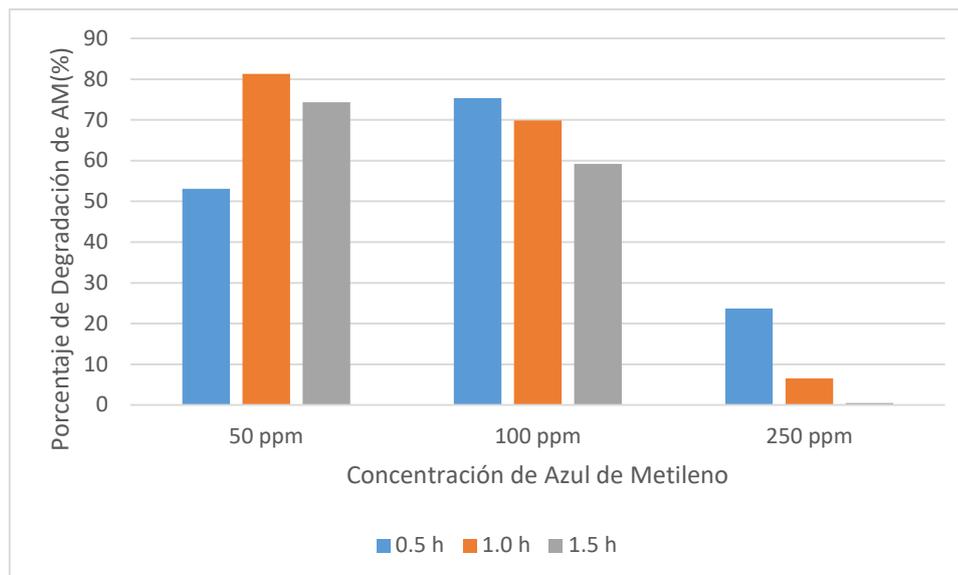


Figura 10. Degradación de azul de metileno con 1.5% de Dióxido de Titanio

De la Figura 11 se infiere que cuando la concentración de azul de metileno se incrementa, el porcentaje de degradación disminuye, este efecto se pudo observar con los tres porcentajes de dióxido de titanio y en los tres tiempos de operación. De esto podemos afirmar que la formación de radicales hidroxilos debe ser directamente proporcional a la concentración de azul de metileno. Esto concuerda con la investigación realizada por LACHHEB *et al.*, (2002) y GARCÉS Y PEÑUELA, 2005.

De acuerdo JING *et al.*, (2011), “la importancia del radical hidroxilo en la degradación de contaminantes orgánicos depende de la naturaleza de la molécula a ser degradada, aunque también pueden existir mecanismos de degradación diferentes para cada contaminante y está en función a las condiciones experimentales bajo las cuales se realice la degradación fotocatalítica”. En la presente investigación la degradación también depende de la concentración de azul de metileno Tal como se contrasta en las Figuras 8,9 y10.

4.4. Análisis estadístico de los resultados

Se utilizó el software estadístico InfoStat/L, para determinar la correlación de Pearson de la cual se puede afirmar que la degradación de AM es directamente proporcional al tiempo de tratamiento en horas y al porcentaje de dióxido de titanio e inversamente proporcional a la concentración de la solución. Así también se aplicó un Test de Duncan de donde se puede observar que no existe diferencia significativa en la aplicación del tiempo de tratamiento, sin embargo, en los tratamientos la concentración de AM presenta una diferencia significativa a la concentración de 250 ppm, mientras entre las concentraciones de 50 y 100 ppm, no hay

diferencia. Respecto al porcentaje de dióxido de titanio, la prueba de Duncan nos muestra que existe una diferencia significativa entre el 0.5% de TiO_2 y los tratamientos de 1 % y 1.5% de TiO_2 (Ver anexo).

V. CONCLUSIONES

- Se rechaza la hipótesis planteada, ya que la degradación del colorante de azul metileno mediante el tratamiento fotocatalítico de luz UV fue al 81.36 % y no superior al 90% como se esperaba.
- Los valores de pH, la conductividad y la absorbancia del agua residual textil artificial preparada incrementan en forma directa al incremento de concentración del azul de metileno.
- La degradación de azul de metileno es directamente proporcional al tiempo de tratamiento en horas y al porcentaje de dióxido de titanio e inversamente proporcional a la concentración de la solución.
- Los porcentajes más altos de degradación del colorante azul de metileno mediante el tratamiento fotocatalítico de luz UV, fueron obtenidos en el tiempo de 1 hora.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Se recomienda, realizar pruebas de comparación de degradación con energía solar a fin de determinar las ventajas respecto a eficiencias de ambos métodos.
- Realizar investigaciones de optimización entre la relación de calidad y cantidad de colorante y catalizador a fin de incrementar las eficiencias de los procesos fotocatalíticos.
- Realizar pruebas comparativas de degradación del colorante azul de metileno a diferentes rangos de pH.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ÁLVAREZ, H. O. 1999. Propuesta para la prevención y reducción de contaminantes y reducción a las aguas residuales en una planta de tejido de hilo e hilazas. Medellín: Sena.
- BUMPUS, JHON.. TRICKER, J., ANDRZEJEWSKI, K., RHOADS, H., TATARKO, M.,1999. Remediation of water contaminated with azo dye: an undergraduate laboratory experiment utilizing an inexpensive photocatalytic reactor. Journal of Chemistry Education. Vol 76. No. 12.
- CANDAL, R., BILMES, S.A. BLESA, M.A.,2004. Semiconductores Con Actividad Fotocatalítica, en Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea», Segunda edición, editores B. Sánchez Cabrero y M.A. Blesa, Editorial CIEMAT, Madrid. ISBN 84-7834-489-6, Capítulo 4, 101.
- CANDAL, R., J. RODRÍGUEZ, G., COLÓN S., GELOVER, E., VIGIL S., JIMÉNEZ, M.A., 2004. Materiales para Fotocatálisis y Electrofotocatálisis, en Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea», Segunda edición, editores B. Sánchez Cabrero y M.A. Blesa, Editorial CIEMAT, Madrid. ISBN 84-7834-489-6, Capítulo 7, 189-210.
- CHACÓN, J., 2003. Mineralización de colorantes por foto Fenton y energía solar. Instituto mexicano de tecnología del agua.
- CLAVIJO J.,2013. Sobre las reacciones de eliminación de compuestos contaminantes de aguas por fotocatalisis con TiO_2 /UV: caso azul de metileno, Revista Elementos - Número 3 - Junio de 2013,Colombia.
- DOMÈNECH X., JARDIM W., LITTER M., 2004.Research Gate <https://www.researchgate.net/publication/290852253>.
- GARCES L.,2003. Fotocatálisis con TiO_2 de los colorantes azul de metileno y naranja reactivo 84 utilizando colector solar. Medellín, agosto 2003; 208 h. Tesis de maestría. Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería.
- GARCÉS, L., PEÑUELA, G., 2005. Cinética de degradación y mineralización del colorante naranja reactivo 84 en aguas. Revista Lasillista de investigación, 2, 21-25.

- GUO, M., NG, A., LIU, F., DJURISIC, A., CHAN, W.,2011. Photocatalytic activity of metal oxides – The role of holes and OH* radicals. *Applied Catalysis B: Environmental*, 107, 150–157.
- HERNÁNDEZ M., ARGUETA L., 1999. La fotocatalisis y sus aplicaciones. Tesis de Licenciatura en Ciencias Químicas no publicada, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de El Salvador.
- HOFFMANN, M.R., MARTIN S., CHOI W., BAHNEMANN, D., 1995. *Chem. Rev.*, 95, 69.
- JING, J., LIU, M., COLVIN, V. L., LI, W., YU, W. W.,2011. Photocatalytic Degradation of Nitrogen-containing Organic Compounds over TiO₂ , *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* (2010), doi:10.1016/j.molcata.2011.10.002
- LACHHEB H., PUZENATA E., HOUAS A., KSIBI M., ELALOUI E., GUILLARD C., HERRMANN J.,2002. Photocatalytic degradation of various types of dyes (Alizarin S, Crocein Orange G, Methyl Red, Congo Red, Methylene Blue) in water by UV-irradiated titania, *Applied Catalysis B: Environmental* 39 (2002) 75–90
- MILLS A., LE HUNTE S.1997. An overview of semiconductor photocatalysis, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 108 (1997) 1-35
- MORRISON S.R.,1980. “Electrochemistry at Semiconductor and Oxidized Metal Electrodes”. Editorial Plenum Press. Nueva York, EEUU .
- RED ARGENTINA, T.,2012. Colorantes Textiles. Red textil Argentina.
- SALAS, G. 2003. Tratamiento físico-químico de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Ing. Química*. Vol 5 N.º 2.
- SILVA, A. 2005. Degradación fotocatalítica del Azo colorante Azul – 71 del efluente textil sobre UV/TiO₂ . *Anales de la Universidad Nacional Agraria de La Molina (UNALM)*. Lima.
- SERPONE N., PELIZZETTI E., 1989. *Photocatalysis—Fundamentals and Applications*. Wiley-Interscience, New York.

SHOURONG, Z., QINGGUO, H., JUN, Z., BINGKUN, W., 1997. A study on dye photoremoval in TiO₂ suspension solution. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 108, 235.

VAN DRIEL, B.A., KOOYMAN, P.J., VAN DEN BERG, K.J., SCMIDT-OTT, A., DIK, J., 2016. A quick assessment of the photocatalytic activity of TiO₂ pigments — From lab to conservation studio!”, *Microchem. J.*, 126, 162–171.

VIII. ANEXO

Anexo I: Absorbancia de los tratamientos

Tabla 5. Medición de las absorbancias de los tratamientos y sus repeticiones en la investigación

Tratamientos		Absorbancia de las soluciones después del tratamiento con UV a 247 nm								
		0.5% TiO ₂			1% TiO ₂			1.5% TiO ₂		
		50 ppm	100ppm	250 ppm	50 ppm	100pp	250 ppm	50 ppm	100ppm	250 ppm
		AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM	AM
T1= 0.5h	Testigo	0.112	0.216	0.799	0.112	0.216	0.799	0.112	0.216	0.799
	1R	0.106	0.244	0.932	0.305	0.401	0.629	0.212	0.186	0.757
	2R	0.103	0.242	0.928	0.301	0.402	0.629	0.214	0.188	0.756
	3R	0.108	0.245	0.933	0.307	0.408	0.625	0.216	0.183	0.758
T2= 1 h	Testigo	0.112	0.216	0.799	0.112	0.216	0.799	0.112	0.216	0.799
	1R	0.228	0.091	0.847	0.111	0.225	0.894	0.085	0.229	0.926
	2R	0.226	0.093	0.846	0.112	0.224	0.896	0.086	0.225	0.928
	3R	0.224	0.091	0.845	0.112	0.226	0.895	0.084	0.228	0.927
T3 = 1.5	Testigo	0.112	0.216	0.799	0.112	0.216	0.799	0.112	0.216	0.799
	1R	0.115	0.185	0.934	0.309	0.125	0.952	0.118	0.306	0.989
	2R	0.112	0.184	0.936	0.311	0.126	0.953	0.117	0.308	0.988
	3R	0.114	0.188	0.935	0.308	0.127	0.951	0.116	0.309	0.99

Anexo II: Panel fotográfico**Figura 11.** Equipo fotocatalítico utilizado en la investigación**Figura 12.** Preparación de las soluciones de azul de metileno



Figura 13. Aplicación del tratamiento fotocatalítico.



Figura 14. Medición de las absorbancias en el espectrofotómetro UV visible



Figura 15. Muestras de las soluciones de azul de metileno para ser leídas en el espectrofotómetro.

Anexo III: Resultado de análisis estadístico

Coefficientes de correlación

Correlación de Pearson

<u>Variable(1)</u>	<u>Variable(2)</u>	<u>n</u>	<u>Pearson</u>	<u>p-valor</u>
Degradación de AM(%)	Degradación de AM(%)	27	1.00	<0.0001
Degradación de AM(%)	TiO2(%)	27	0.55	0.0027
Degradación de AM(%)	tiempo(horas)	27	0.02	0.9199
Degradación de AM(%)	Concentración AM(ppm)	27	-0.47	0.0125
TiO2(%)	Degradación de AM(%)	27	0.55	0.0027
TiO2(%)	TiO2(%)	27	1.00	<0.0001
TiO2(%)	tiempo(horas)	27	0.00	>0.9999
TiO2(%)	Concentración AM(ppm)	27	0.00	>0.9999
tiempo(horas)	Degradación de AM(%)	27	0.02	0.9199
tiempo(horas)	TiO2(%)	27	0.00	>0.9999
tiempo(horas)	tiempo(horas)	27	1.00	<0.0001
tiempo(horas)	Concentración AM(ppm)	27	0.00	>0.9999
Concentración AM(ppm)	Degradación de AM(%)	27	-0.47	0.0125
Concentración AM(ppm)	TiO2(%)	27	0.00	>0.9999
Concentración AM(ppm)	tiempo(horas)	27	0.00	>0.9999
<u>Concentración AM(ppm)</u>	<u>Concentración AM(ppm)</u>	<u>27</u>	<u>1.00</u>	<u><0.0001</u>

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Degradación de AM(%)	27	0.64	0.53	62.46

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	13782.67	6	2297.11	5.96	0.0011
tiempo(horas)	525.88	2	262.94	0.68	0.5169
Concentración AM(ppm)	6560.65	2	3280.32	8.51	0.0021
TiO2(%)	6696.14	2	3348.07	8.69	0.0019
Error	7709.68	20	385.48		
<u>Total</u>	<u>21492.35</u>	<u>26</u>			

Test:Duncan Alfa=0.05*Error: 385.4840 gl: 20*tiempo(horas) Medias n E.E.

0.5 27.64 9 6.54 A

1.5 29.04 9 6.54 A

1.0 37.62 9 6.54 A*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)***Test:Duncan Alfa=0.05***Error: 385.4840 gl: 20*Concentración AM(ppm) Medias n E.E.

250 10.35 9 6.54 A

50 36.39 9 6.54 B

100 47.56 9 6.54 B*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)***Test:Duncan Alfa=0.05***Error: 385.4840 gl: 20*TiO₂(%) Medias n E.E.

0.5 11.01 9 6.54 A

1.0 33.95 9 6.54 B

1.5 49.34 9 6.54 B*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)*