



FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON TiO_2 Y $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$ PARA LA REDUCCIÓN DE TENSOACTIVOS EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

AUTOR

ERIKA PAMELA CHÁVEZ BEDOYA

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON TiO_2 Y TiO_2+Cd PARA LA REDUCCIÓN DE TENSOACTIVOS EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

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

Profesor guía
MSc. Viviana Pavlova Sigcha Terán

Autora
Erika Pamela Chávez Bedoya

Año
2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Evaluación de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 y $\text{TiO}_2 + \text{Cdots}$ para la reducción de tensoactivos en aguas residuales provenientes de la industria textil, a través de reuniones periódicas con la estudiante Erika Pamela Chávez Bedoya, en el semestre 2019-10, 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".

Viviana Pavlova Sigcha Terán
Máster en Gestión Integral del Agua
C.C 172221616-3

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 y $\text{TiO}_2 + \text{Cdots}$ para la reducción de tensoactivos en aguas residuales provenientes de la industria textil, de Erika Pamela Chávez Bedoya, en el semestre 2019-10, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Daniel Hernán Hidalgo Villalba
Magister en Ciencias Especialización Ingeniería Ambiental
C.C 180191444-9

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.”

Erika Pamela Chávez Bedoya
C.C 1803982329

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora guía por su predisposición para solventar todas las dudas a lo largo de mi proceso de titulación. Al personal encargado de los laboratorios por todas las facilidades prestadas. A la empresa Textiles Recalex por abrirme las puertas para el desarrollo de mi tesis y mis prácticas especialmente al Ing. César Chamorro. Finalmente, un agradecimiento al coordinador de la carrera y a todos los docentes por siempre estar dispuestos a guiarnos y reforzar nuestros conocimientos.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, por ser un apoyo incondicional en cada etapa de mi vida tanto personal como universitaria. A mi hermana por ser mi compañera y mi mejor amiga. A mi familia por siempre estar pendiente de mí. A mi novio por ser mi cómplice y mi gran apoyo en todo este proceso. A mis amigos por las risas y los consejos.

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la efectividad que tiene la fotocatalisis heterogénea para remover tensoactivos presentes en las aguas residuales provenientes de la industria textil. Las muestras de agua fueron tomadas de las descargas realizadas por la empresa Textiles RECALEX, posterior a un tratamiento de coagulación-floculación. Estas muestras fueron caracterizadas antes y después de aplicar los tratamientos, para esto se consideraron los siguientes parámetros: pH, conductividad, demanda química de oxígeno (DQO), potencial oxido-reducción, turbidez, absorbancia y tensoactivos. Para la evaluación de tensoactivos se consideraron los análisis de los dos grupos mayormente consumidos a nivel mundial: tensoactivos aniónicos y no iónicos. Se utilizó dos tipos de catalizadores: TiO_2 de grado técnico y TiO_2 dopado con puntos de carbono, para evaluar si este último afecta el porcentaje de remoción. Las concentraciones de catalizador fueron de 1 y 3 gramos. Para la obtención de puntos de carbono se utilizó como precursor el ácido cítrico y para el dopaje de TiO_2 se utilizó el método microondas. Se utilizó un diseño experimental 2^2 . El análisis de resultados se presenta de una forma descriptiva y estadística. La parte estadística corresponde a un análisis de diseño factorial completo donde se realiza un análisis de varianzas y un análisis de efectos expresados en un diagrama de Pareto y cubos. Para tensoactivos aniónicos, el mejor resultado se alcanzó con 3g de TiO_2 y 1g de $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$ alcanzando 99.15% de remoción en ambos casos. En los tensoactivos no iónicos, el mejor resultado se alcanzó con 3g de $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$ alcanzando 70% de remoción. Se evaluó, además, el efecto de agregar un oxidante al proceso. Para esto se añadió 0.6ml de H_2O_2 a cada tratamiento. Para tensoactivos aniónicos, el resultado fue el mismo que sin el uso del oxidante. En los tensoactivos no iónicos, el mejor resultado se alcanzó con 3g de $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$ alcanzando 85% de remoción. Concluyendo finalmente que este proceso es efectivo no solamente para la reducción de tensoactivos sino también para remover materia orgánica y color.

ABSTRACT

In the present work, the effectiveness of heterogeneous photocatalysis to remove surfactants present in wastewater from textile industry is evaluated. The water samples were taken from the discharges made by Textiles RECALEX after a coagulation-flocculation treatment. These samples were characterized before and after applying the treatments. For this, the following parameters were considered: pH, conductivity, chemical oxygen demand (COD), oxide-reduction potential, turbidity, absorbance and surfactants. For the evaluation of surfactants, the analyzes of the two groups most consumed worldwide were considered: anionic and nonionic surfactants. Two types of catalysts were used: TiO_2 of technical grade and TiO_2 doped with carbon dots, to evaluate if the latter affects the percentage of removal. The catalyst concentrations were 1 and 3 grams. To obtain carbon points, citric acid was used as a precursor and the microwave method was used for doping TiO_2 . An experimental design was used 2^2 . The analysis of results is presented in a descriptive and statistical way. The statistical part corresponds to a complete factorial design analysis where an analysis of variances is carried out and an analysis of effects expressed in a Pareto and cubes diagram. For anionic surfactants, the best result was reached with 3g of TiO_2 and 1g of TiO_2 +Cdots reaching 99.15% removal in both cases. In non-ionic surfactants, the best result was reached with 3g of TiO_2 +Cdots reaching 70% removal. The effect of adding an oxidant to the process was also evaluated. For this, 0.6ml of H_2O_2 was added to each treatment. For anionic surfactants, the result was the same as without the use of the oxidant. In non-ionic surfactants, the best result was reached with 3g of TiO_2 +Cdots reaching 85% removal. Finally concluding that this process is effective not only for the reduction of surfactants but also to remove organic matter and color.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Justificación del proyecto	3
2. Marco Teórico	5
2.1 Industria textil.....	5
2.1.1 Generación de aguas residuales	5
2.1.2 Normativa Nacional.....	8
2.1.3 Situación Cantón Rumiñahui	8
2.1.4 Principales procesos industriales.....	8
2.2 Tensoactivos	9
2.2.1 Clasificación de Tensoactivos.....	10
2.2.2 Aplicaciones Industriales	11
2.2.3 Tensoactivos utilizados en la industria textil	12
2.2.4 Impactos Ambientales.....	12
2.3 Tratamiento de Aguas Residuales Industriales	13
2.3.1 Tipos de tratamiento empleados.....	13
2.4 Procesos de Oxidación Avanzada	14
2.4.1 Clasificación.....	15
2.4.2 Fotocatálisis.....	16
2.4.3 Fotocatálisis Homogénea	17
2.4.4 Fotocatálisis Heterogénea	18
2.4.4.1 Ventajas y Desventajas de la Fotocatálisis Heterogénea	18
2.4.4.2 Propiedades y Características del catalizador TiO_2	19
2.4.5 Puntos de Carbono	19

2.4.5.1 Ventajas de los puntos de carbono.....	20
2.5 Descripción del área de estudio.....	20
2.5.1 Localización del área de estudio.....	20
2.5.2 Descripción general de los procesos textiles.....	21
2.5.3 Productos tensoactivos aplicados en la industria.....	22
3. Metodología.....	25
3.1 Toma de muestras.....	25
3.2 Caracterización de muestras.....	26
3.3 Diseño Experimental.....	29
3.4 Adición de Peróxido de hidrógeno.....	31
3.5 Síntesis de puntos de carbono.....	32
3.6 Dopaje de TiO ₂	33
3.7 Proceso Experimental.....	33
3.8 Determinación porcentaje de remoción.....	34
4. Resultados.....	35
4.1 Análisis Descriptivo.....	35
4.1.1 pH.....	40
4.1.2 Conductividad.....	42
4.1.3 Demanda Química de Oxígeno.....	44
4.1.4 Turbidez.....	48
4.1.5 Potencial Oxido-Reducción.....	49
4.1.6 Absorbancia.....	50
4.1.7 Tensoactivos.....	52
4.1.7.1 Tensoactivos Aniónicos.....	52
4.1.7.2 Tensoactivos No Iónicos.....	56
4.2 Análisis Estadístico.....	60
4.2.1 pH.....	60
4.2.2 Conductividad.....	64

4.2.3 DQO.....	67
4.2.4 Turbidez.....	70
4.2.5 Potencial Oxido-Reducción.....	73
4.2.6 Absorbancia.....	76
4.2.7 Tensoactivos Aniónicos	80
5. Análisis De Resultados	86
5.1 pH.....	86
5.2 Conductividad.....	87
5.3 Demanda Química de Oxígeno.....	88
5.4 Turbidez.....	89
5.5 Potencial Oxido-Reducción.....	90
5.6 Absorbancia.....	90
5.7 Tensoactivos	90
5.8 Catalizador Dopado con Puntos de Carbono	93
6. Conclusiones y Recomendaciones	95
6.1 Conclusiones	95
6.2 Recomendaciones.....	96
REFERENCIAS	98
ANEXOS	104

1. Introducción

1.1 Antecedentes

La industria textil forma parte de uno de los sectores más importantes del país y debido al crecimiento que ha tenido el mismo a lo largo de los años, en la actualidad representa al segundo sector que produce más fuentes de trabajo y contribuye con cerca del 7% del PIB del país (AITE, 2018). Sin embargo, es una industria en la que se utiliza una gran cantidad de agua y una gran variedad de productos químicos dentro de sus procesos productivos, por lo que genera una contaminación importante principalmente en el recurso agua.

El continuo desarrollo de este sector manufacturero ha permitido que se produzcan y comercialicen una mayor variedad de productos, lo que ha resultado en un cambio en los procesos tradicionales y en la naturaleza y cantidad de productos químicos empleados, tales como: colorantes, detergentes, entre otros compuestos recalcitrantes, en donde su concentración y tipo varían según la demanda del mercado (Alisanfi et al.,2007, p.439). Esto provoca que el agua residual proveniente de esta industria tenga una composición más diversa y compleja de tratar.

Dentro de los procesos de producción textil, se encuentran la fase de tintura y acabados donde se genera la mayor cantidad de agua residual. Aquí se utilizan una serie de productos de estructura y naturaleza muy variada como: almidones, compuestos químicos, colorantes sintéticos, metales y detergentes (Textiles Recalex, 2018). Estos detergentes son tensoactivos, los cuales presentan en su estructura una parte hidrofílica y otra hidrofóbica, otorgándole a este tipo de sustancias diversas propiedades tales como: reducción de la tensión superficial, alta solubilidad, acción dispersante o humectante, entre otras (Ríos, 2010, p.13). Gracias a estas propiedades, los tensoactivos poseen una gama amplia de

aplicaciones dentro de procesos industriales. Sin embargo, por su variada naturaleza, estos pueden ser muy diversos y poco biodegradables y se los ha incluido dentro de los denominados contaminantes emergentes (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012)

Por tal motivo, este tipo de contaminantes no presenta resultados eficaces bajo tratamientos convencionales, siendo necesario el uso de métodos más complejos como es el caso de los procesos de oxidación avanzada. Estos procesos se basan en reacciones tanto físicas como químicas para modificar la estructura de los contaminantes y producir agentes altamente oxidantes como los radicales hidroxilos, mediante el uso de luz solar, luz UV u otro tipo de energía, para así oxidar y mineralizar a los elementos contaminantes (Chiva, Berlanga, Martínez, & Climent, 2017).

En este sentido se han realizado diversas investigaciones para determinar la degradación no solo de tensoactivos en la industria textil, sino también de los colorantes que en ella se aplican. Así pues, se ha utilizado el proceso de fotocatalisis con TiO_2 para tratar detergentes comerciales tanto con una exposición a la luz solar como a la luz UV, obteniendo porcentajes de reducción de detergentes entre el 65 y 80% (Carvajal, 2011, p.100).

Asimismo, se han realizado estudios con el fin de trasladar estos procesos a nivel industrial donde se han creado prototipos y plantas de tratamiento utilizando esta tecnología en países como Estados Unidos, Alemania y uno de los proyectos más emblemáticos en este campo en Almería-España, donde existen instalaciones para tratamiento de aguas residuales, tanto domésticas como industriales, aplicando tecnologías que también sean amigables con el ambiente como es el caso de la radiación solar; de esta manera se han realizado estudios y proyectos aplicando procesos de fotocatalisis homogénea y heterogénea, desinfección solar, ozono, electro-oxidación, entre otros (PSA, 2018).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar la efectividad de la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 y $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$ en la reducción de tensoactivos en aguas residuales provenientes de la industria textil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el agua residual para conocer su estado antes y después de la aplicación de los procesos de fotocatalisis heterogénea.
- Sintetizar puntos de carbono utilizando como precursor al ácido cítrico.
- Determinar el porcentaje de reducción de tensoactivos en el agua residual posterior a cada tratamiento.

1.3 Justificación del proyecto

Cerca de 70 sustancias químicas se han encontrado en el agua residual de industrias textiles que provienen mayoritariamente del teñido, de los cuales aproximadamente 30 no pueden ser tratados en su totalidad (Kant, 2012, p.23). Debido a su estructura química y a las características propias de los tensoactivos, estos tienen diferentes efectos sobre el medio ambiente. Se ha visto que los tensoactivos tienen una gran actividad biológica, lo que puede provocar daños en la función biológica de microorganismos, invertebrados o plantas (Ivankovic & Hrenovic, 2009). Estos efectos no solo perjudican la vida en el agua o el suelo, sino que también puede afectar el funcionamiento y el tratamiento de los lodos en las plantas de tratamiento de agua. Debido a la formación de espuma, se ve disminuido el intercambio gaseoso y al momento de la degradación de los tensoactivos se pueden generar sustancias similares a las hormonas, lo que

puede afectar a la reproducción de especies acuáticas (Ríos, 2014). También pueden aportar fósforo al medio lo que provoca un mayor crecimiento de algas, menor cantidad de oxígeno, malos olores y alteración a la vida acuática (Carvajal, 2011, p.95). Asimismo, pueden afectar el crecimiento y la reproducción de organismos invertebrados en el suelo, así como también alterar la tasa de crecimiento de las plantas (Venhuis & Mehrvar, 2004).

Por este motivo, la aplicación de procesos de oxidación avanzada ha ganado un amplio terreno en el tratamiento y reducción de contaminantes como los tensoactivos. La fotocatalisis hace uso de catalizadores de bajo costo como el TiO_2 que es un buen semiconductor y tiene una buena actividad fotocatalítica. Sin embargo, esta actividad está limitada para un rango de luz de entre 400 y 700 nm y sólo el 5% de la irradiación solar que llega a la superficie de la tierra está en rango UV (Alisanfi et al., 2007, p.440). La nanotecnología y los puntos de carbono pueden potenciar el efecto fotocatalítico del TiO_2 , pues los puntos de carbono combinan las propiedades ópticas de los puntos cuánticos y propiedades electrónicas del carbón (Wang, Lu, Tang, & Xu, 2017) y son una opción económica, de fácil obtención, muy biocompatibles, de baja toxicidad, solubles en agua y con propiedades fotoluminiscentes.

El objetivo de esta investigación es comparar la efectividad de la fotocatalisis heterogénea como tratamiento para la disminución de tensoactivos en aguas residuales de origen textil, presentando como opción el dopaje del TiO_2 para evaluar la alternativa de potenciar el proceso de fotocatalisis frente a una fuente de luz con el fin de brindar una opción amigable con el ambiente pero que sea viable económicamente para una futura aplicación a nivel industrial.

2. Marco Teórico

2.1 Industria textil

La industria textil empezó su desarrollo en el siglo XVI, y desde su nacimiento, se convirtió en una de las principales actividades económicas del país. Para la producción textil se ha utilizado tanto fibras naturales como sintéticas entre ellas: seda, algodón, nailon, poliéster, entre otros. Actualmente, este sector no solamente se centra en la fabricación de productos textiles como hilo y tela, sino que también el área de confección ha ganado un mayor campo. La actividad textil se ha ubicado mayormente en las provincias de Azuay, Guayas, Tungurahua, Imbabura y Pichincha (Ordoñez, 2015).

La mayor parte de la producción generada por este sector, se enfoca en satisfacer las necesidades locales; sin embargo, las industrias han decidido apostarle a los ingresos generados por la exportación, razón por la cual, los empresarios han invertido en tecnología y capacitación a su personal para mejorar la productividad, calidad y variedad de sus productos para de esta manera poder ingresar a mercados internacionales (AITE, 2018).

2.1.1 Generación de aguas residuales

En una fábrica textil de producción media se puede consumir alrededor de 30 y 50 litros de agua para obtener un kilogramo de tela, donde la mayor cantidad de agua residual se genera en el proceso de teñido (Kant, 2012, p.23).

Para poder obtener el color especificado y productos libres de grasas e imperfecciones, es necesario el uso de distintos productos químicos tales como: detergentes, peróxido, colorantes, sales, entre otros. Por tal motivo, descargar el agua residual a un cuerpo hídrico sin tratamiento, conlleva a un gran daño

ambiental. Además de la compleja composición del agua residual por los distintos productos que se emplean, el agua residual de estos procesos se caracteriza por tener un pH que puede variar entre 5 y 10, temperaturas que pueden alcanzar los 35°C, una alta demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO), baja biodegradabilidad y alta cantidad de sólidos suspendidos (Solís et al., 2013, p.586). En la Tabla1 se muestra la caracterización general del agua residual proveniente de la industria textil, a partir de sus diferentes procesos de producción.

Tabla 1.
Caracterización general de aguas residuales y productos utilizados los diferentes procesos textiles

PROCESOS	PRODUCTOS UTILIZADOS	CONSUMO DE AGUA (L/ton)	DQO (mg/l)	pH
DESENGOMADO	Secuestrante ¹ Jabón Sal	5000-20000	-	6-7
DESCRUDE	Secuestrante Estabilizadores ² Detergentes NaOH	2500-43000	-	10-12
BLANQUEO	Agentes humectantes ³ H ₂ O ₂ NaOH Blanqueador óptico	2500-25000	960-6200	8-12
TEÑIDO	Colorantes Sales Secuestrantes Fijadores	10000-30000	250-3800	6-10

Adaptado de (Solís et al., 2013)

Nota: Secuestrante¹: compuestos capaces de unir iones metálicos y formar una estructura que estabilicen o evitan la precipitación de otros compuestos (Schlumberger, 2018).

Estabilizador²: evita que los compuestos reacciones o cambien su estructura química.

Humectantes³: los tensoactivos son los principales humectantes.

2.1.2 Normativa Nacional

Con el fin de preservar la calidad del agua, el Ministerio del Ambiente, emitió el Acuerdo Ministerial 097-A referente a la reforma de los anexos del Texto Unificado de Legislación Secundaria, en donde pone en conocimiento los límites máximos permisibles de distintos parámetros que debe contener el agua residual previa a una descarga ya sea al alcantarillado o a un cuerpo de agua dulce, especificadas en la tabla 8 y 9 respectivamente. De esta manera, haciendo referencia a la cantidad de tensoactivos presentes en el agua residual, el valor máximo es de 2mg/l. En cambio, si la descarga es a un cuerpo de agua dulce, este valor no debe superar los 0.5mg/l.

2.1.3 Situación Cantón Rumiñahui

En el cantón Rumiñahui, perteneciente a la provincia de Pichincha, existen diversas industrias ubicadas al sur-este de la zona urbana. La mayor parte de la producción de estas industrias está destinada a satisfacer las necesidades nacionales y se estima que cerca del 65% de la población trabaja en relación con estas industrias y a la comercialización de sus productos. Dentro del sector manufacturero existen 4287 industrias, de las cuales 22 industrias se dedican a la elaboración de productos textiles (GADMUR, 2014). Dentro de las industrias textiles más representativas del cantón se encuentra: Textiles Recalex, Textiles San Pedro, Textil Padilla, Enkador.

2.1.4 Principales procesos industriales

El primer proceso dentro de la fabricación de textiles corresponde a la preparación, en donde se eliminan de la tela todo tipo de impurezas y manchas. Esto se puede realizar mediante el uso de detergentes o enzimas. A continuación, la tela pasa al proceso de teñido, proceso en el cual se aplican los tintes que

pueden ser de origen orgánico o sintético. Además de los tintes, es necesario utilizar productos químicos auxiliares que permitan fijar el color y otorgarle diversas características requeridas para el producto terminado, tales como: enzimas, sales, ácidos, agentes secuestrantes y dispersantes, agentes oxidantes y agentes reductores (Correia, Stephenson, & Judd, 1994, p.925).

Finalmente, se encuentra el proceso de acabado, en donde la tela pasa por varios tratamientos para eliminar residuos de colorantes y otras sustancias empleadas anteriormente y para que el producto adquiera las especificaciones requeridas. Para esto, se utiliza: suavizantes, tensoactivos, impermeabilizantes, entre otros. Posterior a estos tratamientos, la tela pasa por equipos que le brindan vapor para eliminar arrugas y permitir que la tela sea correctamente etiquetada y almacenada. En cada proceso, el volumen que se utiliza de productos químicos y agua depende de la cantidad y tipo de tela a tratar (Moore & Ausley, 2004, p.587).

2.2 Tensoactivos

Los tensoactivos son compuestos químicos que tienen un efecto sobre la tensión superficial del agua, debido a las características de su estructura, por lo que también se los denomina “agentes de superficie”. La tensión superficial disminuye, los tensoactivos se disuelven y son más penetrante en los materiales en donde estará en contacto (Ríos, 2010).

En cuanto a su estructura, esta presenta una parte polar hidrófila y una apolar hidrófoba. Estos compuestos logran disminuir la tensión superficial debido a que la parte polar se coloca entre las moléculas de agua y el aire, de tal manera que se las moléculas en la superficie se atraen (Cantarero, 2010).

2.2.1 Clasificación de Tensioactivos

Según la estructura de la parte hidrofílica, los tensioactivos pueden clasificarse en aniónicos, no iónicos, catiónicos y anfóteros. Los tensioactivos aniónicos tienen carga negativa y un grupo carboxilato, sulfato o sulfonato. Estos representan el grupo más producido y usado a nivel mundial. El segundo grupo de tensioactivos más usados corresponde a los no iónicos, que tienen en su estructura hidrofílica un grupo éter, alcohol, éster y en la parte hidrófoba un grupo alquil. Sin embargo, estos no se ionizan pues su estructura hidrofílica no se puede disociar (Krishnan, Chandran, & Sinnathambi, 2016).

Los catiónicos en cambio, poseen carga positiva y están formados por amonio cuaternario y grupos metilos o bencilos (Ivankovic & Hrenovic, 2009). Finalmente, están los llamados anfóteros, que tienen esta denominación porque pueden ionizarse de tal manera que pueden adquirir un carácter catiónico o aniónico y son compatibles con los demás tensioactivos. Los más conocidos de este grupo son los óxidos de amina que pueden ser alifáticos, aromáticos, entre otros (Ríos, 2010).

En la Tabla 2 se presentan a los tensioactivos más conocidos e importantes de cada clase y la abreviación definida para cada uno de ellos.

Tabla 2.

Principales tensioactivos según su clasificación

Tipo	Nombre	Abreviación
ANIONICO	Alquilbenceno sulfonato lineal	LAS
	Sodio dodecil sulfato	SDS

	Sodio lauril sulfato	SLS
NO IONICO	Alquilfenol etoxilado	APE
	Alcohol etoxilado	AE
CATIONICO	Amonio cuaternario	QAC
	Cloruro de Benzalconio	BAC
	Bromuro Cetil trimetil amonio	CTAB
ANFOTERO	Oxido de amina	AO

Adaptado de (Ivankovic, 2009)

2.2.2 Aplicaciones Industriales

Gracias a la estructura de los tensoactivos, cada uno de ellos puede tener una gran variedad de aplicaciones, como por ejemplo: los aniónicos están presentes en la formulación de cosméticos y en las sustancias activas de fármacos, los catiónicos en productos de cuidado personal y en desinfectantes, los anfóteros se usan como catalizadores y en productos de cuidado personal; y los no iónicos se emplean en las formulaciones de pesticidas (Ivankovic & Hrenovic, 2009). En la tabla 3 se presentan los mayores usos industriales de los tensoactivos:

Tabla 3.
Principales usos de los tensoactivos en la industria

USOS INDUSTRIALES		
Formulación de cosméticos	Producción de papel	Plásticos y pinturas
Pesticidas	Plastificación y fluidización de cementos	Extracción de petróleo

Productos de limpieza	Dispersantes en productos agrícolas	Sustancias contra incendios
Industria alimenticia	Industria textil	Polimerización de látex
Aditivos en combustibles	Curtiembre	Dispersión de colorantes
Aditivos en aceites lubricantes	Tratamiento de metales	Emulsificadores de petróleo, ceras y disolventes

Adaptado de (Cantarero, 2010)

2.2.3 Tensoactivos utilizados en la industria textil

En la industria textil los tensoactivos catiónicos son usados en la elaboración de detergentes y suavizantes de telas, los anfóteros como agentes antiestáticos y estabilizadores, los aniónicos como detergentes, agentes espumantes, emulsionantes y dispersantes (Yuan et al., 2014, p.2234).

2.2.4 Impactos Ambientales

Todos los productos que tienen en su composición tensoactivos contienen además aditivos que potencian las propiedades de estos. Los aditivos sumados a los elementos que forman parte de la composición de los tensoactivos aportan gran cantidad de fosfatos que provoca un mayor crecimiento de plantas acuáticas y algas, alterando la demanda de oxígeno y todo intercambio gaseoso, lo que se ve reflejado en una alteración de la calidad del cuerpo hídrico (Cubillos, 2006, p. 8). Los tensoactivos pueden modificar el pH y por lo tanto alterar el ciclo de las especies que viven en el agua, además de afectar el proceso de asimilación de las sustancias esenciales para su desarrollo. También pueden ser solubilizados ciertos iones de metales pesados y producir tanto bioacumulación como biomagnificación. Una elevada concentración de tensoactivos en el agua puede provocar un aumento de la cantidad de cloro lo que puede tener efectos

carcinogénicos y mutagénicos para especies de flora y fauna. Además, los tensoactivos pueden ser también indicadores de contaminación por otro tipo de sustancias (Carvajal, 2011, p.95).

Asimismo, una elevada cantidad de tensoactivos en el agua residual puede afectar procesos dentro de una planta de tratamiento: aumento de sólidos suspendidos, corrosión en la infraestructura, disminución de la eficiencia de procesos de tratamiento tales como cloración y floculación. Los productos de la degradación parcial de los tensoactivos tales como nonil y octil fenoles, pueden adherirse con fácil a los sólidos que se encuentran suspendidos en el agua, dotándoles de la capacidad de imitar hormonas naturales (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012, p.59).

2.3 Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

2.3.1 Tipos de tratamiento empleados

Los tratamientos de aguas residuales pueden ser primarios, secundarios y terciarios, dentro de los que se tienen distintos tipos de procesos que pueden ser aplicados según las características y composición del agua, tal como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4.

Tipos de tratamiento de aguas residuales y sus principales procesos

TRATAMIENTOS	PROCESOS
PRIMARIO	Cribado Sedimentación Separación de aceites y grasas
SECUNDARIO	Coagulación-floculación

	Lodos activados Lagunas de aireación Filtros percoladores Tratamiento anaerobio
TERCIARIO	Osmosis inversa Intercambio iónico Microfiltración Cloración Ozonización Adsorción mediante carbón activado Procesos de Oxidación Avanzada

Adaptado de (Carvajal, 2011)

2.4 Procesos de Oxidación Avanzada

Estos procesos tienen varias ventajas sobre los procesos convencionales, pues al presentar un mayor potencial de oxidación, se pueden tratar sustancias con una estructura más compleja, pues existe una mineralización más completa de los contaminantes, evitando de esta manera, que se produzcan subproductos tales como los clorados que tiene efectos carcinógenos. Además, los POA pueden reducir la persistencia del oxidante, que puede llegar a ser tóxico para los microorganismos existentes en procesos biológicos posteriores; y, en estos mismos tratamientos biológicos, pueden ser eliminados los subproductos generados después de la oxidación pues, si lleva a cabo una mineralización completa, se obtendrán productos de estructura más simple que los contaminantes y con una toxicidad baja o nula (Ikehata & Gamal, 2004).

Los POA se basan en la generación de agentes oxidantes fuertes, como los radicales hidroxilos, en una concentración suficiente tal que permita degradar los contaminantes presentes en el agua de una manera completa y efectiva. La

formación de estos radicales puede darse a través de reacciones químicas, fotoquímicas, sonoquímicas o electroquímicas. Esta formación de radicales puede ser mejorada en gran medida por la presencia de una fuente de luz como la ultravioleta o luz solar, siendo esta última, más viable tanto económica como ambientalmente (Oturán & Aaron, 2014).

2.4.1 Clasificación

Para el tratamiento de sustancias complejas y poco biodegradables, la comunidad científica ha desarrollado diversas tecnologías en donde se puede utilizar fuentes de luz, oxidación química, electricidad, etc. La Figura 1 muestra una clasificación de las tecnologías que forman parte de los procesos de oxidación avanzada.

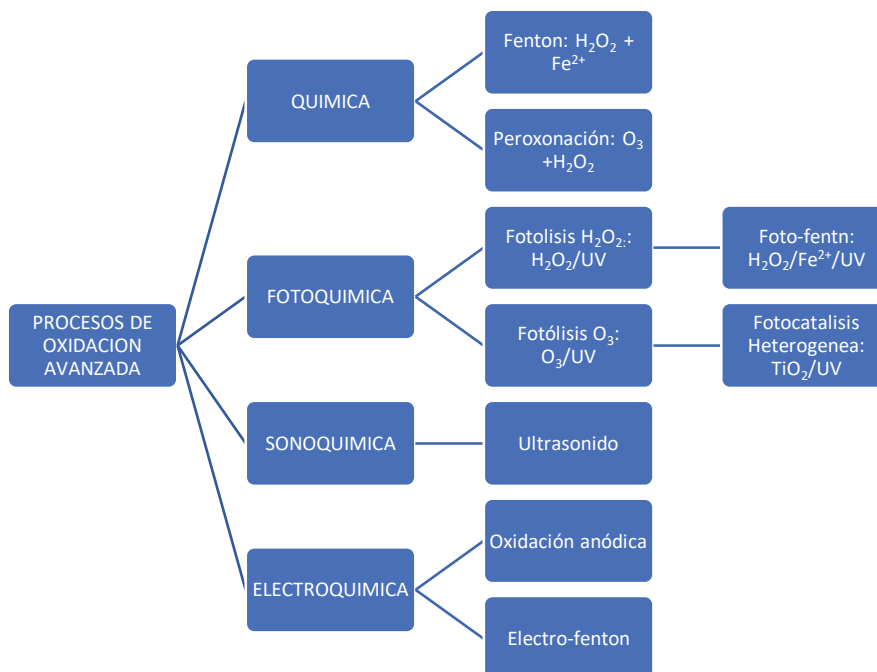


Figura 1. Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada.

Adaptado de (Oturán & Aaron, 2014)

2.4.2 Fotocatálisis

La fotocatalisis se considera como la catálisis producida sobre la superficie de un semiconductor, a partir de una reacción química generada por un efecto fotónico provocado por la irradiación de luz, en donde se produce tanto una oxidación como una reducción, donde la oxidación da paso a la foto generación de huecos u orificios y la reducción permite la foto generación de electrones (Fujishima, Zhang, & Tryk, 2008).

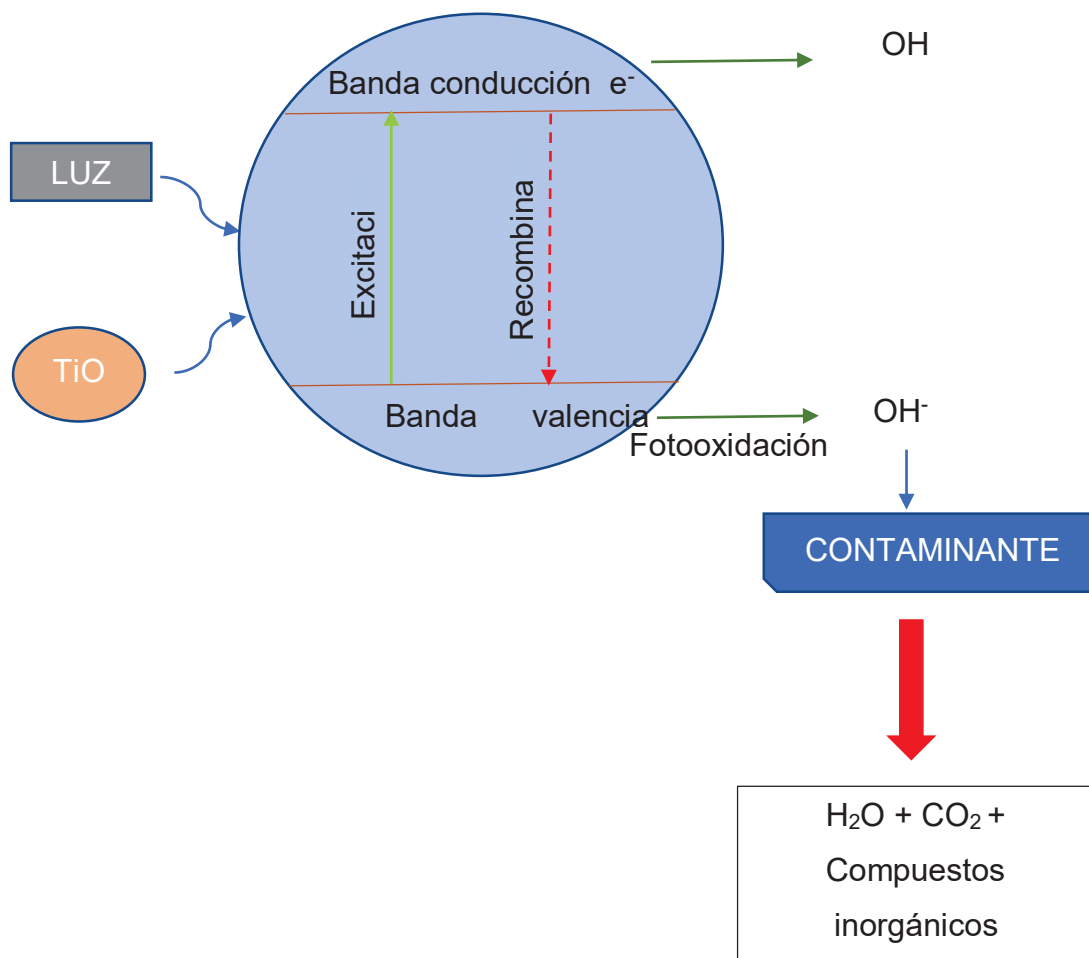


Figura 2. Diagrama del proceso de fotocatalisis.

Adaptado de (Ahmed, Rasul, Martens, Brown, & Hashib, 2011)

2.4.3 Fotocatalisis Homogénea

La fotocatalisis homogénea corresponde a un proceso de carácter fotocatalítico, pues se aplica radiación de una fuente lumínica, en donde el fotocatalizador se encuentra disuelto. Además de un catalizador, se utiliza también elementos con un gran poder oxidante para formar radicales hidroxilos ((Bandala, Corona-Vásquez,, & Guis, 2007, p.55).

Este tipo de fotocátalisis es mejor conocido como Fenton, en donde se utiliza una mezcla de peróxido de hidrógeno y una sal de hierro donde el Fe^{+2} actúa como catalizador para dar paso a la descomposición del H_2O_2 , dando lugar a que radicales OH^\cdot se formen y actúan como especies súper oxidantes (Brillas, Sirés, & Oturan, 2009, p.6575).

2.4.4 Fotocatálisis Heterogénea

En este proceso de oxidación el catalizador más utilizado es el TiO_2 en la fase anatasa, donde se utiliza una fuente de luz para iniciar un proceso fotocatalítico en la superficie del semiconductor, para que de esta forma los electrones de la banda de valencia pueden moverse a la banda de conducción, creando así electrones y agujeros con carga positiva (Wang & Xu, 2012). Tanto los electrones como los huecos generados reaccionan con las moléculas presentes en el medio, como el oxígeno, y forman aniones con un fuerte carácter oxidante; también se puede dar una reacción entre los huecos y los electrones que donan las sustancias que se encuentran en las muestras dando como resultado la formación de radicales hidroxilo que permiten la mineralización de contaminantes (Alisanfi, y otros, 2007). La eficiencia de este proceso puede aumentarse mediante la adición de Ozono o H_2O_2 , pues los electrones en la banda de conducción al entrar en contacto con estos elementos, los descomponen y producen mayor cantidad de radicales hidróxidos, que junto con la interacción de la luz ultravioleta y la foto generación de pares electrón-huecos, permiten una mayor mineralización de los contaminantes (Visitación & Gamboa, 2005).

2.4.4.1 Ventajas y Desventajas de la Fotocatálisis Heterogénea

Las principales ventajas de la fotocátalisis heterogénea es que son procesos que pueden ser operados a temperatura ambiente y presión atmosférica; tienen una baja selectividad, posee una alta eficiencia, permite degradar gran variedad de

compuestos; el fotocatalizador puede ser activado mediante radiación solar o con lámparas artificiales y tiene un costo bajo tanto en materiales como en operación (Stasinakis, 2008, p.377).

Entre las desventajas de este proceso de oxidación se presentan baja eficiencia cuántica del catalizador para absorber luz visible, cinéticas de descomposición lentas, pueden formarse productos tóxicos si la oxidación es parcial, procesos para recuperar y desactivar al catalizador y es necesario controlar una serie de parámetros para optimizar el proceso (Ahmed, Rasul, Martens, Brown, & Hashib, 2011).

2.4.4.2 Propiedades y Características del catalizador TiO_2

El TiO_2 ha sido el catalizador más utilizado y estudiado en los procesos de Fotocatálisis heterogénea porque es un material semiconductor con una amplia banda de valencia que permite la oxidación, tiene una alta fotoactividad, alta estabilidad química, no posee actividad biológica, tiene bajo costo, y no representa un riesgo para el medio ambiente (Oturán & Aaron, 2014, p.2592). Este catalizador puede presentarse en tres formas: rutilo, anatasa y brookita, de las cuales, la estructura conocida como anatasa es la forma más común y estable (Fujishima, Zhang, & Tryk, 2008). La actividad fotocatalítica del TiO_2 puede ser aumentada mediante un proceso de dopaje que implica la inclusión o sustitución de un átomo presente en el catalizador por un átomo distinto para modificar sus estados electrónicos y propiedades ópticas (Henderson, 2011, p.190).

2.4.5 Puntos de Carbono

Los puntos de carbono también son conocidos como nanopuntos de carbono o puntos cuánticos de carbono. Debido a su tamaño, corresponden al grupo de nanopartículas, puesta están por debajo de los 10 nm. Estas nanopartículas

poseen propiedades ópticas y electrónicas únicas (Wang, Lu, Tang, & Xu, 2017). Gracias a estas propiedades, los puntos de carbono pueden ser utilizados en procesos fotocatalíticos para el tratamiento de contaminantes, dispositivos fotovoltaicos, biosensores, fármacos, bioimágenes, entre otros (Qin, 2013).

Los puntos de carbono pueden ser obtenidos mediante procesos químicos o físicos. Dentro de los procesos químicos pueden aplicarse tecnologías electroquímicas, hidrotermales, oxígeno ácido y microondas. Los procesos físicos en cambio pueden ser: ablación, plasma y láser (Xu, 2014). De estos procesos, el uso de microondas ha sido de particular interés, pues se pueden obtener velocidades de reacciones más rápidas, rendimientos químicos más elevados y un uso menor de energía.

2.4.5.1 Ventajas de los puntos de carbono

Los puntos de carbono han despertado un creciente interés científico debido a que poseen una alta solubilidad en medio acuoso, toxicidad baja, alta actividad fotocatalítica, resistencia a la fotodecoloración (Xu, 2014). Una gran ventaja, es que los puntos de carbono pueden obtenerse a partir de materiales económicos y de nula toxicidad tales como naranja o sandía (Zhou, 2011).

2.5 Descripción del área de estudio

2.5.1 Localización del área de estudio

La empresa TEXTILES RECALEX, de la cual se obtuvieron las muestras de agua residual, se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, parroquia Cotogchoa, en el kilómetro 3^{1/2} vía a Amaguaña.



Figura 3. Ubicación geográfica de la industria textil

Tomado de (Google Earth, 2018)

Para producir 600 kg de tela de cualquier color se utilizan aproximadamente 9000 litros de agua; y para producir 600 kg de tela blanca y gris se requieren alrededor de 6000 litros de agua. Las aguas residuales generadas son descargadas en la quebrada “Las Lanzas”.

2.5.2 Descripción general de los procesos textiles

Dentro de los procesos de la industria textil estudiada, el área que utiliza una mayor cantidad de productos químicos y, sobre todo una gran cantidad de sustancias tensoactivas es el área de tintura, dentro de la cual se pueden encontrar los procesos productivos mostrados en la Figura 4:

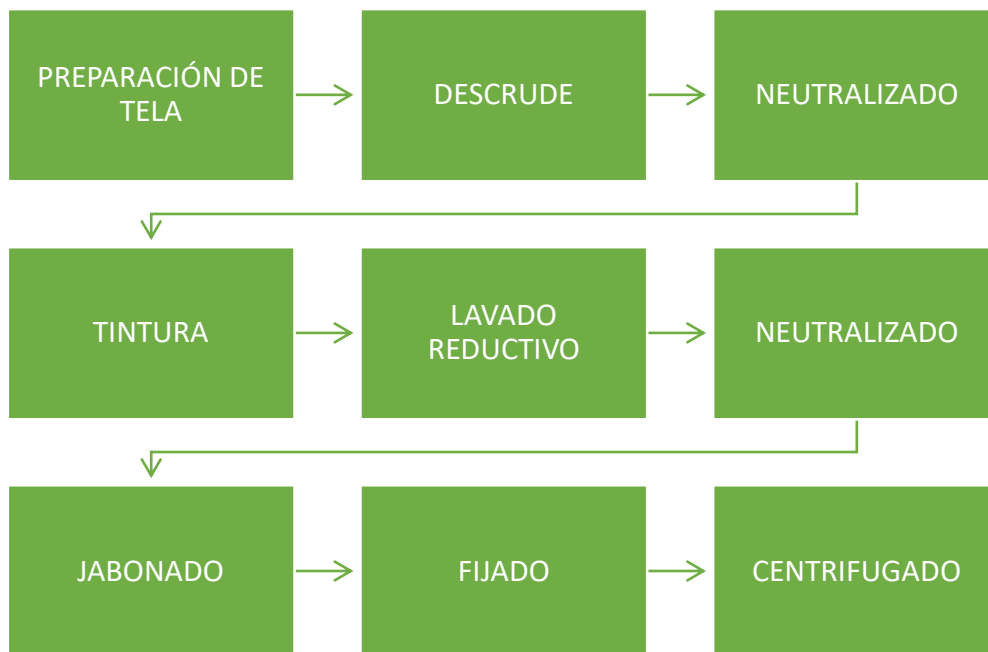


Figura 4. Diagrama de los procesos del área de tintura.

Tomado de (TEXTILES RECALEX, 2018)

En la preparación de la tela solamente se desenrolla la tela mediante un cilindro mecánico. En el descruce, se eliminan aceites, grasas y residuos de fibras vegetales. En el siguiente proceso se eliminan los residuos excedentes del tratamiento anterior. En la tintura se da color a la tela. A continuación, se realiza un lavado para eliminar los residuos de colorantes y poder pasar así al proceso de neutralización para regular el pH. Después, se eliminan los colorantes hidrolizados y se procede a realizar un proceso de fijado del color. Finalmente, se colocan suavizantes a la tela para darle un mejor terminado y se lleva al centrifugado para reducir la humedad y pasar a los procesos siguientes.

2.5.3 Productos tensoactivos aplicados en la industria

Para la ejecución de los procesos industriales dentro de la etapa de tintura, se utilizan diversos productos que contienen tensoactivos, tal como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5.
Productos que contienen tensoactivos utilizados en los procesos de tintura

PRODUCTO	CARACTERISTICAS	TENSOACTIVOS
AV-PON SLN-S	Es un detergente universal para tratamientos textiles. Contiene tensoactivos especiales y antiespumante.	No iónico, ligeramente aniónico
SOFTEX	Suavizante para algodón y mezclas. Tiene una mezcla de ésteres y amidas grasas.	No iónico ligeramente catiónico
CESPERSOL	Es un difusor y dispersante para la tintura de poliéster y sus mezclas. Está compuesto por tensoactivos y disolventes acuosos.	No iónico / Aniónico
PRETEX SYQ HEB	Es un detergente biodegradable con gran poder limpiador y desinfectante. Se lo utiliza para el proceso de blanqueo.	Aniónico
HUMERSOL SYQ- P13	Alto poder detergente, humectante y solvente que puede ser utilizado en fibras sintéticas y naturales.	No iónico

Tomado de (Textiles RECALEX, 2018)

En la Figura 5 se muestran los distintos productos utilizados en los procesos llevados a cabo en el área de tintura.



Figura 5. Diagrama de entrada de productos en los procesos del área de tintura. Tomado de (Textiles RECALEX, 2018)

3. Metodología

3.1 Toma de muestras

La fábrica textil cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales industriales, la cual realiza un proceso de cribado y, posteriormente un tratamiento primario de coagulación-floculación. Las muestras de agua fueron tomadas a la salida del tratamiento primario, previo a su descarga. En el punto, se tomaron muestras compuestas; en total se recogieron dos muestras de 3 litros cada una con un intervalo de 2 y 3 horas después de aplicado el tratamiento de coagulación-floculación, para posteriormente homogeneizarlas y obtener una sola muestra representativa.

Las muestras fueron colocadas en recipientes de plástico, transportadas en un cooler a 4°C y almacenadas a la misma temperatura hasta su tratamiento y análisis, como lo indica la norma NTE INEN 2169.



Figura 6. Planta de tratamiento de aguas residuales

3.2 Caracterización de muestras

Las muestras levantadas en la empresa textil fueron caracterizadas antes y después del tratamiento de fotocatalisis heterogénea. La caracterización físico-química involucró los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno (DQO), absorbancia, turbidez, potencial de óxido-reducción (ORP) y tensoactivos aniónicos y no iónicos.

Los parámetros que se midieron se describen a continuación:

- **pH**

Determinado mediante técnica electroquímica en base a la utilización de un potenciómetro de mesa marca HANNA Instrument, modelo HI 2550.

- **Conductividad eléctrica**

Este parámetro fue medido con el potenciómetro descrito previamente. El resultado fue expresado en unidades mS/cm.

- **DQO**

La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó mediante kits de ensayo rápido, marca Lovibond. Se procedió a colocar 2ml en el vial de ensayo, se agitó por 2 minutos y se colocó dicho vial en un biodigestor, marca Macherey-Nagel por 2 hora a 148°C para propiciar una digestión ácida. A continuación, se agitó y se dejó enfriar hasta que llegue a temperatura ambiente.

Finalmente, la lectura del parámetro se la realizó en un espectrofotómetro marca MN, modelo UV/VIS a 620 nm por medio del método 029 que tiene un rango de lectura de 100 a 1500 mg/LO₂, tal como se observa en la figura 7:

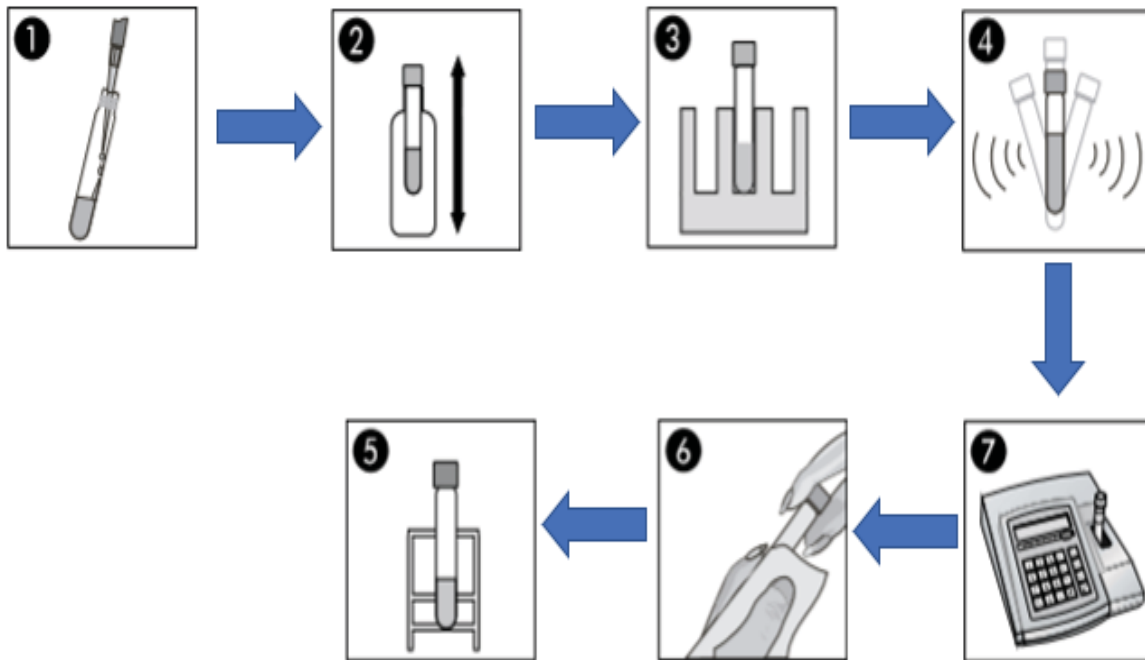


Figura 7. Procesos para determinar la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

- **Absorbancia**

El agua residual posee un color cian, por lo que la longitud de onda definida para medir la absorbancia en el espectrofotómetro es de 500 nm (Abril, s.f).

- **Turbidez**

Este parámetro fue medido a través del espectrofotómetro donde se determinó las unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Se utilizó agua destilada como valor cero.

- **Potencial Oxido-reducción (ORP)**

Se midió por medio del potenciómetro marca HANNA Instrument, modelo HI 2550, donde se cuantifica el intercambio de electrones, que es equivalente a una tensión eléctrica, lo que permite identificar la presencia de sustancias oxidantes o reductoras. El valor medido se expresa como mV, en donde un valor positivo indica la presencia de sustancias oxidantes y un valor negativo la presencia de sustancias reductoras.

- **Determinación de tensoactivos**

La eficiencia del tratamiento de fotocátalisis heterogénea se midió en función a dos variables respuesta que son los dos tipos de tensoactivos mayormente consumidos a nivel mundial: aniónicos y no iónicos.

ANIONICOS

Las muestras fueron enviadas a analizar en los laboratorios de la Universidad Central del Ecuador, en donde se aplicó el método de análisis de las sustancias activas al azul de metileno MAM-74 / APHA 5540 C MODIFICADO.

NO IONICOS

Estos compuestos se analizaron a través de kits de ensayo rápido, marca MN. Se procedió a colocar 4ml en el vial de ensayo, se agitó por 2 minutos hasta que las dos fases se mezclaron por completo. Transcurrido este tiempo, se llevó el vial de ensayo al espectrofotómetro y se utiliza el método 0-47 que posee un rango de lectura de 0.3 a 15mg/l.

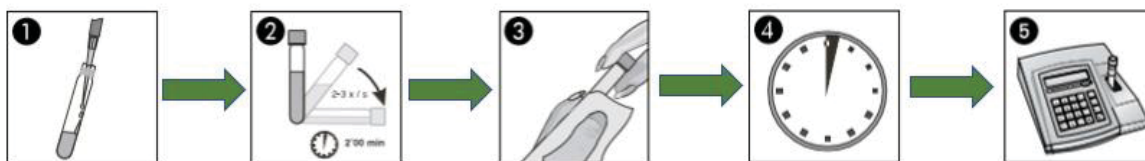


Figura 8. Kits de ensayo rápido

3.3 Diseño Experimental

Tanto para los tratamientos con TiO_2 y con $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$ se tomaron en cuenta las siguientes variables:

- Antes de aplicar los distintos tratamientos, fue necesario modificar el pH para lo cual, las muestras de agua fueron llevadas a un pH de 3.5 utilizando H_2SO_4 1N.
- Se realizó una prueba con distintas concentraciones de TiO_2 : 0.1, 0.5, 1 y 3 g/l; para definir dos concentraciones con las cuales se analizarán los procesos de fotocatalisis heterogénea y su eficiencia para reducir tensoactivos.
- Se aplicaron cuatro tipos de tratamiento: TiO_2 , $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$, $\text{TiO}_2+\text{H}_2\text{O}_2$ y $\text{TiO}_2+\text{Cdots}+\text{H}_2\text{O}_2$, siendo los dos últimos tratamientos de optimización mediante la adición de un oxidante (H_2O_2).
- Se utilizó un volumen de muestra de agua residual de 1L y los tratamientos se realizaron en un test de jarras a 150 rpm.
- Los tratamientos fueron expuestos a luz UV por un periodo de 6 horas. El test de jarras fue cubierto con una estructura negra que contiene 2 lámparas UV de 120-277 V.

En base a las consideraciones antes mencionadas, se definieron los siguientes diseños experimentales:

Tabla 6.
Diseño Factorial Completo - Variables y niveles de estudio

FACTORES	NIVEL (-)	NIVEL (+)
A: Tipo de catalizador	TiO ₂	TiO ₂ +Cdots
B: Concentración catalizador	1 gr/l	3 gr/l

Tabla 7.
Tratamientos experimentales

TRATAMIENTOS	A	B	RESULTADOS
1	TiO ₂	1 gr/l	Y ₁
2	TiO ₂	3 gr/l	Y ₂
3	TiO ₂ +Cdots	1 gr/l	Y ₃
4	TiO ₂ +Cdots	3 gr/l	Y ₄

Una vez obtenidos los resultados del tratamiento de fotocatalisis heterogénea, se propone una mejora alternativa a este proceso de oxidación avanzada, mediante la adición de H₂O₂ al 30%, a fin de observar si existe un mayor efecto.

Tabla 8.
Diseño Factorial Completo para la mejora con H₂O₂

FACTORES	NIVEL (-)	NIVEL (+)
A: Tipo de catalizador	TiO ₂ + H ₂ O ₂	TiO ₂ +Cdots+ H ₂ O ₂
B: Concentración catalizador	1gr/l	3gr/l

Tabla 9.

Tratamientos experimentales para mejora de fotocatalisis heterogénea

TRATAMIENTOS	A	B	RESULTADOS
1	TiO ₂ + H ₂ O ₂	1 gr/l	Y ₅
2	TiO ₂ + H ₂ O ₂	3 gr/l	Y ₆
3	TiO ₂ +Cdots+ H ₂ O ₂	1gr/l	Y ₇
4	TiO ₂ +Cdots+ H ₂ O ₂	3gr/l	Y ₈

3.4 Adición de Peróxido de hidrógeno

Para el cálculo de la dosis necesaria de H₂O₂ se ha tomado como referencia la relación establecida por Castañeda (2011) “se considera que 1g de DQO consume al menos 0.0625 mol de H₂O₂ en 1 m³ de agua residual proveniente de actividades petroleras”.

Se tiene que:

$$1g DQO = \frac{0.0625 \text{ mol } H_2O_2}{1m^3} \quad \text{Ecuación 1}$$

Para poder obtener los gramos de H₂O₂ que consume un gramo de DQO es necesario multiplicar esta relación por el número de moles del peróxido de hidrógeno.

$$1g DQO = 0.0625mol * 34 \frac{g}{mol} H_2O_2 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$1g DQO = 2.125 \text{ gramos } H_2O_2 \quad \text{Ecuación 3}$$

Ahora bien, el agua residual objeto de este trabajo de titulación posee un valor de DQO igual a 300 mg/l O₂, por lo tanto, con este valor se aplica (3) y se tiene:

$$[H_2O_2] = \frac{0.3 \text{ gDQO} * 2.125 \text{ gH}_2\text{O}_2}{1000 \text{ l}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$[H_2O_2] = \frac{0.6375 * 10^{-3} \text{ g}}{\text{l}} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$[H_2O_2] = \frac{0.6 \text{ mgH}_2\text{O}_2}{\text{l}}$$

Entonces, se tiene que para la optimización del tratamiento de fotocatalisis heterogénea se necesitan 0.6 mg de H_2O_2 al 30% por cada litro de muestra.

3.5 Síntesis de puntos de carbono

Para la síntesis de puntos de carbono se empleó como precursor al ácido cítrico. Esta síntesis se realizó a través de microondas, para lo cual se colocó 1 gramo de ácido cítrico y 10mL de agua desionizada en un vaso de precipitación y se lo lleva al microondas por 2 minutos. El cambio de coloración de transparente a café claro muestra la formación de los puntos de carbono. Después, se lleva a la centrifuga por 30 minutos para separar las partículas grandes.



Figura 9. Cambio de coloración, indicador de obtención de puntos de carbono

3.6 Dopaje de TiO₂

En un vaso de precipitación de 100 ml se colocó 1 g de TiO₂, 5ml de puntos de carbono y 25 ml de etanol. A continuación, se colocó un agitador magnético, se lo cubrió con una tapa de papel aluminio y se llevó al agitador a 300 rpm por 24 horas. Luego, se ubicó el vaso de precipitación en el horno por 20 horas a una temperatura de 35°C. Finalmente, se sacó del horno, se retiró el contenido de los vasos de precipitación con una cuchara metálica y se lo trituroó en un mortero para obtener un polvo fino. Una vez realizado este procedimiento, se lo guardó en un lugar oscuro.



Figura 10. Obtención de TiO₂ dopado con puntos de carbono

3.7 Proceso Experimental

Los procedimientos seguidos para la realización de la parte experimental se resumen en la Figura 11:

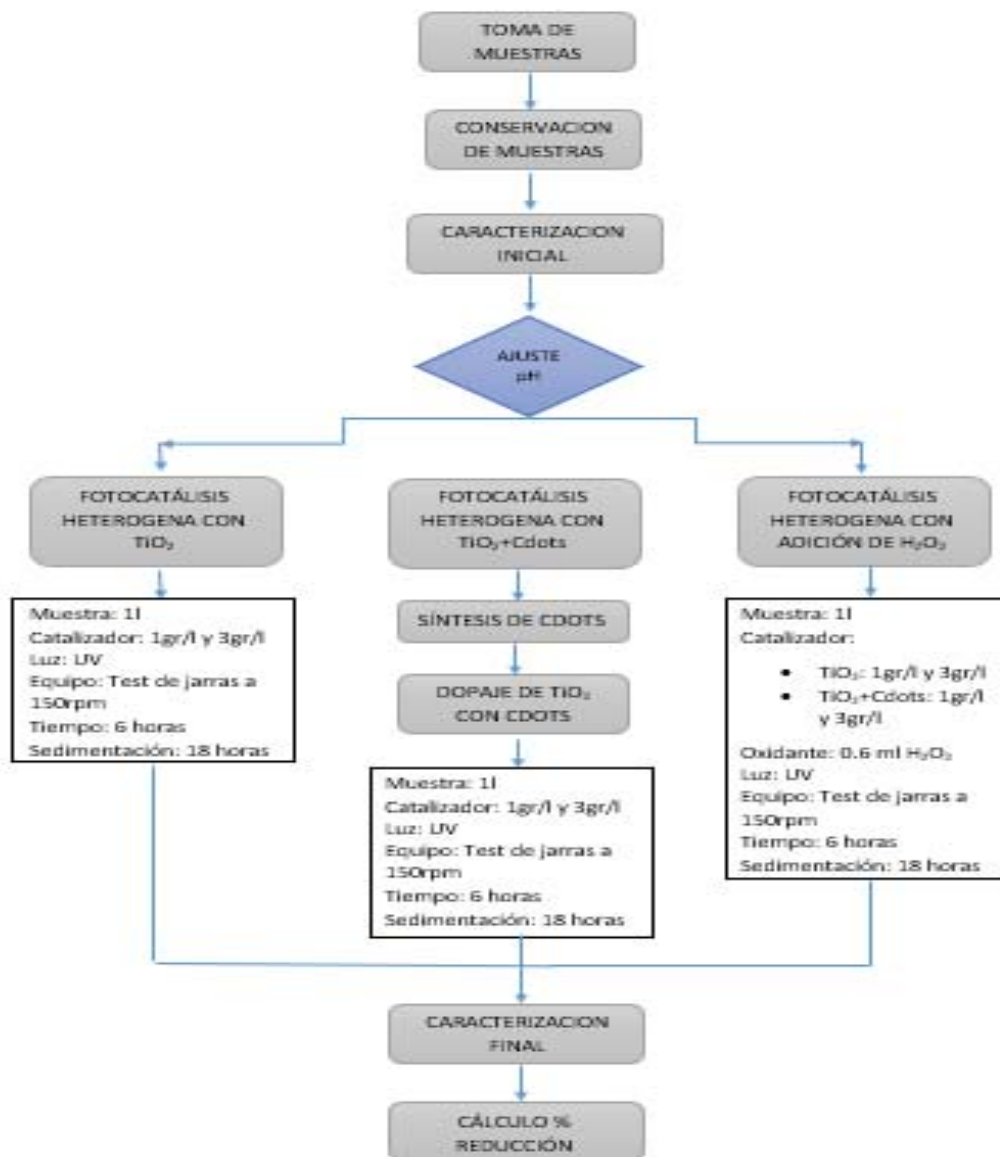


Figura 11. Diagrama del proceso experimental

3.8 Determinación porcentaje de remoción

Para definir el porcentaje de remoción de las variables respuesta en base al diseño de experimentos propuesto, se empleó la siguiente ecuación para su cálculo:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100$$

Ecuación 6

Donde:

Co: Concentración inicial

Cf: concentración final

4. Resultados

4.1 Análisis Descriptivo

El proceso experimental empieza con la caracterización inicial del agua residual, teniendo los resultados siguientes:

Tabla 10.

Caracterización inicial del agua residual proveniente de la industria textil

	pH	Conductividad (mS)	DQO (mg/l)	Turbidez (NTU)	ORP mV	Absorbancia	Tensoactivos No iónicos (mg/l)	Tensoactivos Aniónicos (mg/l)
Muestra inicial	8.8	4	300	19.1	57.3	0.161	16	1.65

Para determinar las concentraciones adecuadas del catalizador TiO_2 para el tratamiento de tensoactivos, se realizó pruebas con cuatro distintas concentraciones del mismo y se analizó la concentración final de los tensoactivos aniónicos, donde se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 11:

Tabla 11.
Valores de tensoactivos aniónicos utilizando distintas concentraciones de catalizador

[TiO ₂] g/l	Tensoactivos Aniónicos (mg/l)
0.1	3.36
0.5	2.04
1	0.399
3	0.014

Tanto para las concentraciones de TiO₂ de 0.1 y 0.5 g/l la cantidad de tensoactivos aniónicos aumentó en 1.71 y 0.39 g/l respectivamente; mientras que para la concentración de catalizador de 1 y 3 g/l hubo una reducción de 1.25 y 1.636 g/l respectivamente. En base a estos resultados, las concentraciones que se utilizaron para la aplicación del modelo experimental fueron de 1 y 3 g/l de TiO₂.

Según la caracterización inicial del agua residual textil, la mayor concentración de estos es de tipo No iónico, por lo que se realizaron pruebas con los tratamientos establecidos para determinar si la variación de pH influye en la degradación de estos tensoactivos.

Tabla 12.

Concentración de tensoactivos No iónicos con pH de la muestra inicial y con variación de pH

TRATAMIENTOS	Tensoactivos No iónicos (mg/l)	
	pH: 8.8	pH: 3.5
Y1	>15	10.2
Y2	>15	6
Y3	14.2	8.5
Y4	14	4.2

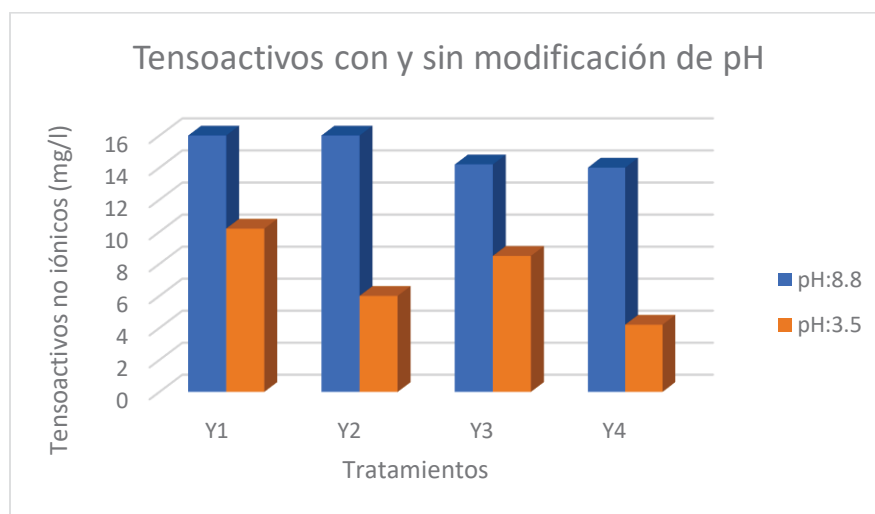


Figura 12. Variación de la concentración de tensoactivos en los tratamientos experimentales con el pH de 8.8 y 3.5

La concentración de tensoactivos no se redujo en los tratamientos con TiO_2 y apenas una ligera remoción con el uso de TiO_2 dopado con puntos de carbono. Sin embargo, con una modificación de pH a un medio ácido, la cantidad de tensoactivos no iónicos sufrió una reducción considerable, por lo que se determinó que es fundamental un ajuste de pH antes de aplicar los tratamientos de

fotocatálisis. Los valores obtenidos de los distintos tratamientos se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 13.

Valores obtenidos de los tratamientos y su réplica en las variables respuestas

Tratamientos	Catalizador (g/l)	pH	Conductividad (mS)	DQO (mg/l)	Turbidez (NTU)	ORP mV	Absorbancia	Tensoactivos No iónicos (mg/l)	Tensoactivos Aniónicos (mg/l)
Y ₁	1	5,9	3,74	201	10	64,7	0,018	13,1	0,275
Y ₁	1	6,4	4,07	199	10	68,7	0,022	10,2	0,399
Y ₂	3	6,4	3,09	130	13,4	70	0,028	7,1	0,014
Y ₂	3	4,5	3,08	124	13,1	95,4	0,026	7,5	0,014
Y ₃	1	3,8	3,08	113	15,6	173,9	0,056	5,5	0,014
Y ₃	1	4	3,02	111	14,7	95,7	0,059	6,7	0,014
Y ₄	3	4	3,05	83	20,1	92,6	0,093	4,6	0,288
Y ₄	3	4,3	3,05	84	21	91,4	0,096	5	0,292

Tabla 14.

Valores promedios de los tratamientos en las variables respuestas

Tratamientos	pH	Conductividad (mS)	DQO (mg/l)	Turbidez (NTU)	ORP mV	Absorbancia	Tensoactivos No iónicos (mg/l)	Tensoactivos Aniónicos (mg/l)
Y ₁	6,15	3,905	200	10	66,7	0,02	11,65	0,337
Y ₂	5,45	3,085	127	13,25	82,7	0,027	7,25	0,014
Y ₃	3,9	3,05	112	15,15	134,8	0,0575	6,1	0,014
Y ₄	4,15	3,05	84	20,55	92	0,0945	4,8	0,29
Muestra inicial	8,8	4	300	19,1	57,3	0,161	16	1,65

Tabla 15.

Valores obtenidos de los tratamientos de mejora y su réplica en las variables respuestas

Tratamientos	Catalizador (g/l)	pH	Conductividad (mS)	DQO (mg/l)	Turbidez (NTU)	ORP mV	Absorbancia	Tensoactivos No iónicos (mg/l)	Tensoactivos Aniónicos (mg/l)
Y ₅	1	3,8	3,08	101	12,1	173,9	0,016	4,2	0,044
Y ₅	1	5,3	2,78	103	11,5	168,8	0,018	5,8	0,031
Y ₆	3	4,1	3,03	91	14,8	169,3	0,024	4,6	0,014
Y ₆	3	5,3	3,17	93	14,1	179,4	0,022	5,1	0,014
Y ₇	1	3,6	3,08	77	16,2	180,4	0,046	3,1	0,014
Y ₇	1	4,7	3,18	76	15,5	199,4	0,066	3,6	0,014
Y ₈	3	3,6	3,24	45	22,5	180,4	0,086	2	0,022
Y ₈	3	4,5	3,15	43	22,8	203,2	0,079	2,8	0,019

Tabla 16.

Valores promedios de los tratamientos de mejora en las variables respuestas

Tratamientos	pH	Conductividad (mS)	DQO (mg/l)	Turbidez (NTU)	ORP mV	Absorbancia	Tensoactivos No iónicos (mg/l)	Tensoactivos Aniónicos (mg/l)
Y ₅	4,55	2,93	102	11,8	171,35	0,017	5	0,0375
Y ₆	4,7	3,1	92	14,45	174,35	0,023	4,85	0,014
Y ₇	4,15	3,13	77	15,85	189,9	0,056	3,35	0,014
Y ₈	4,05	3,195	44	22,65	191,8	0,083	2,4	0,0205
Muestra inicial	8,8	4	300	19,1	57,3	0,161	16	1,65

4.1.1 pH

Después de una modificación de pH 8.8 a 3.5, las muestras de los tratamientos tanto convencionales como de mejora, tuvieron un aumento del pH como se puede observar en la Figura 13:

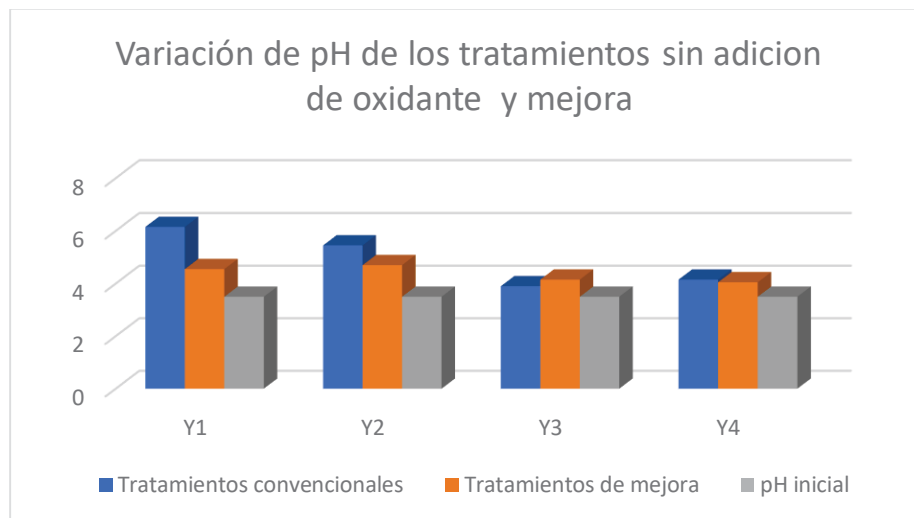


Figura 13. Variación de pH en los tratamientos

En todos los tratamientos el pH aumentó al final de estos. El aumento de este parámetro es mayor en los tratamientos donde solamente se utiliza TiO_2 .

La normativa indica que el valor permisible de pH para descarga a un cuerpo receptor debe estar entre 5-9. Los tratamientos Y_1 y Y_2 cumplen con la normativa. Mientras que los tratamientos Y_3 y Y_4 están por debajo de la norma para poder ser descargados a un cuerpo de agua dulce.

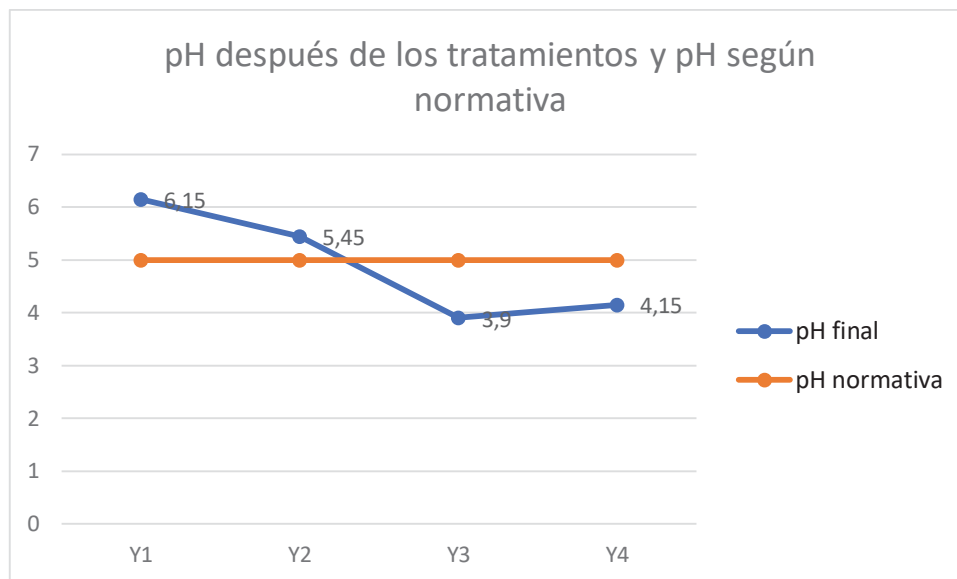


Figura 14. Comparación de los valores de pH con los valores máximos permisibles de descarga de efluentes a un cuerpo receptor

Para los tratamientos de mejora, el pH sufre un ligero aumento, mayor en los tratamientos donde solamente se utiliza TiO_2 . Sin embargo, todos los tratamientos presentan valores que están por debajo de la norma para poder ser descargados a un cuerpo de agua dulce. Sin embargo, el valor más cercano al valor permisible es el obtenido después del tratamiento Y_6 .

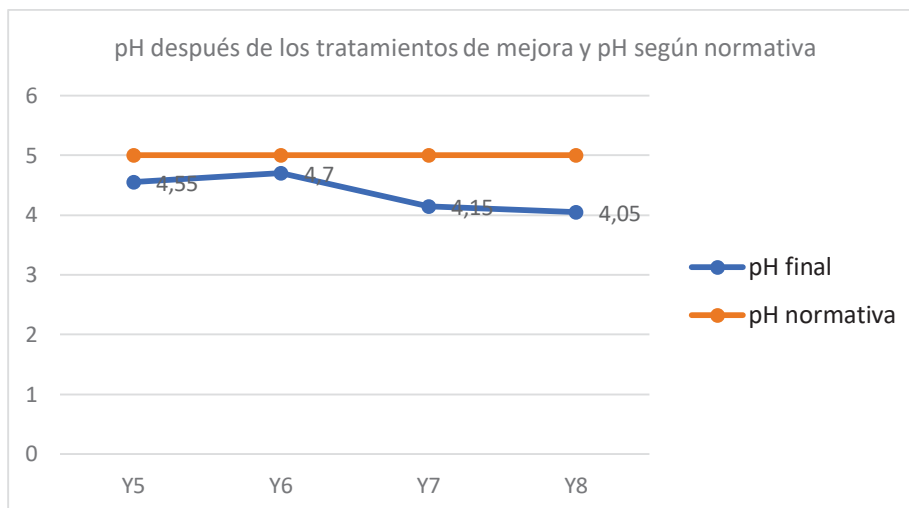


Figura 15. Variación de los valores de pH después de los tratamientos comparados con el valor normativo

4.1.2 Conductividad

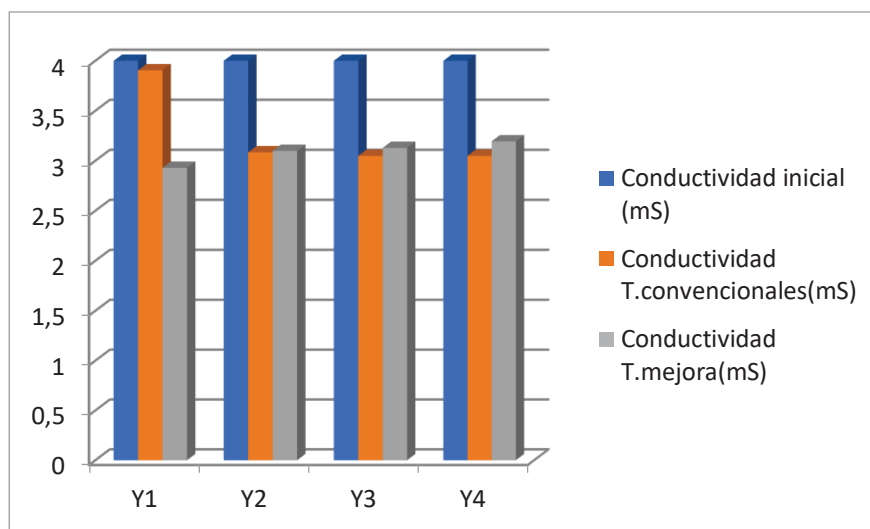


Figura 16. Variación de conductividad en los tratamientos

La conductividad disminuye después de los tratamientos aplicados en relación con el valor de la caracterización inicial. En las figuras 16 y 17 se puede observar una gráfica comparativa con los valores de conductividad de los tratamientos con las

mismas concentraciones de catalizador, pero con la aplicación de TiO_2 sólo y TiO_2 dopado con puntos de carbono para ver el efecto del uso del catalizador dopado.

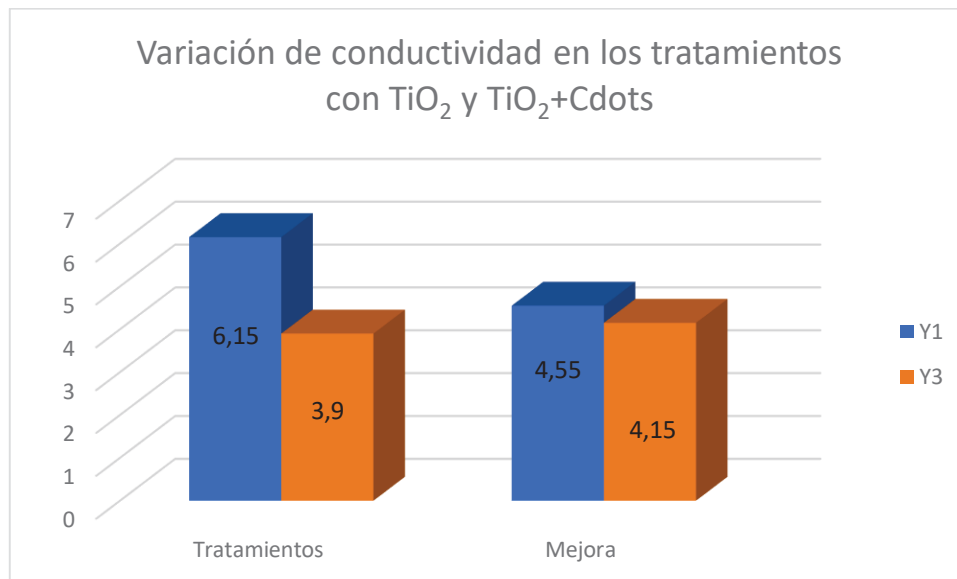


Figura 17. Variación de conductividad en los tratamientos con 1g de TiO_2 y $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$

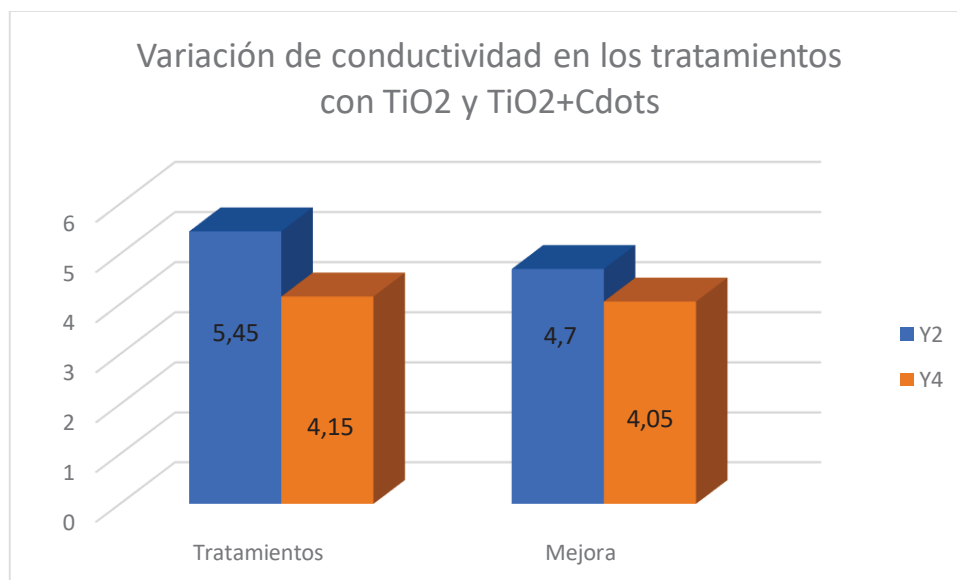


Figura 18. Variación de conductividad en los tratamientos con 3g de TiO_2 y $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$

En las figuras mostradas anteriormente, se puede observar que la conductividad es más baja en los tratamientos donde se utilizó el catalizador dopado.

4.1.3 Demanda Química de Oxígeno

En la Figura 18 se observa que después de aplicados tanto los tratamientos como la modificación de mejora, la demanda química de oxígeno disminuye en todos los casos.

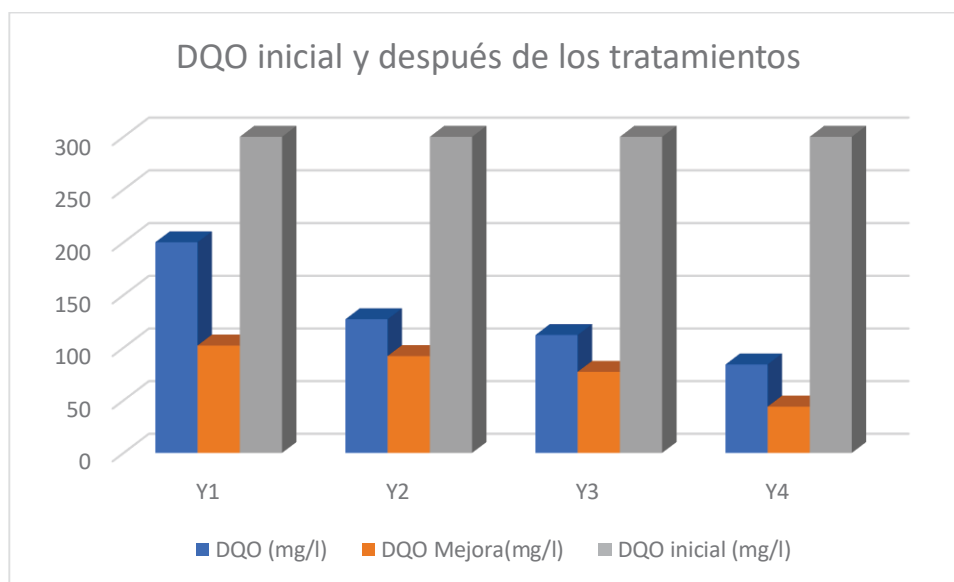


Figura 19. Variación de DQO inicial y después de los tratamientos de fotocátalisis heterogénea

Los valores iniciales de DQO se encuentran sobre el valor máximo permisible para descargas a un cuerpo de agua dulce que corresponde a 250 mg/l. Sin embargo, después de la aplicación de fotocátalisis, todos los valores disminuyeron cumpliendo así con los límites máximos permisibles establecidos por normativa, como se puede observar en la Figura 20.

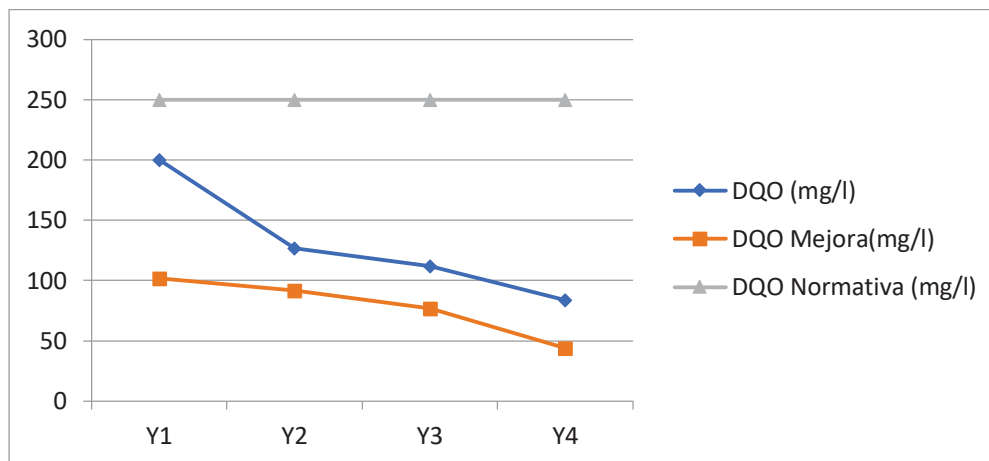


Figura 20. Comparación de los valores obtenidos de DQO después de los tratamientos de fotocatalisis heterogénea y los límites según la normativa

Para poder identificar el efecto del uso de TiO_2 dopado en la disminución de DQO en las muestras, se presentan las figuras 21 y 22, donde se realizó un gráfico comparativo según la cantidad de catalizador utilizado tanto en los tratamientos establecidos en el diseño experimental como los tratamientos de mejora definidos.

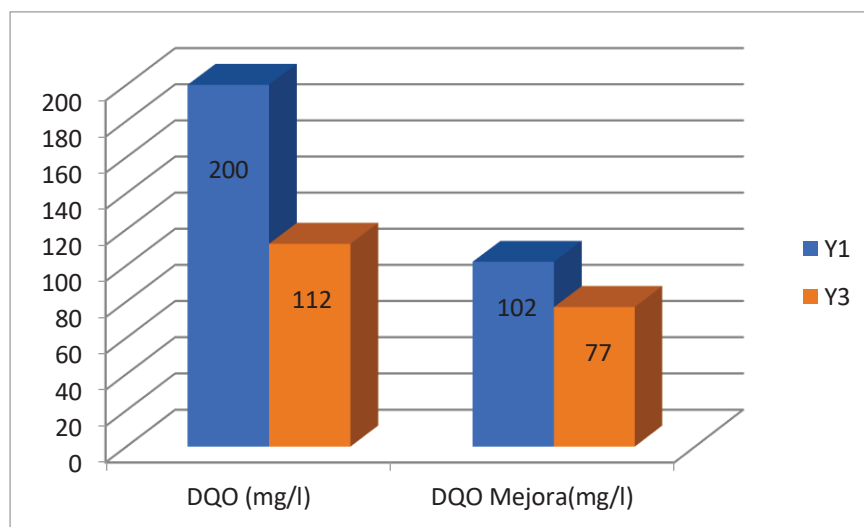


Figura 21. Comparación de los valores de DQO obtenidos en los tratamientos Y₁ Y₃. CONDICIONES DE CATALIZADOR: TiO_2 : 1g; $\text{TiO}_2 + \text{Cdots}$: 1g

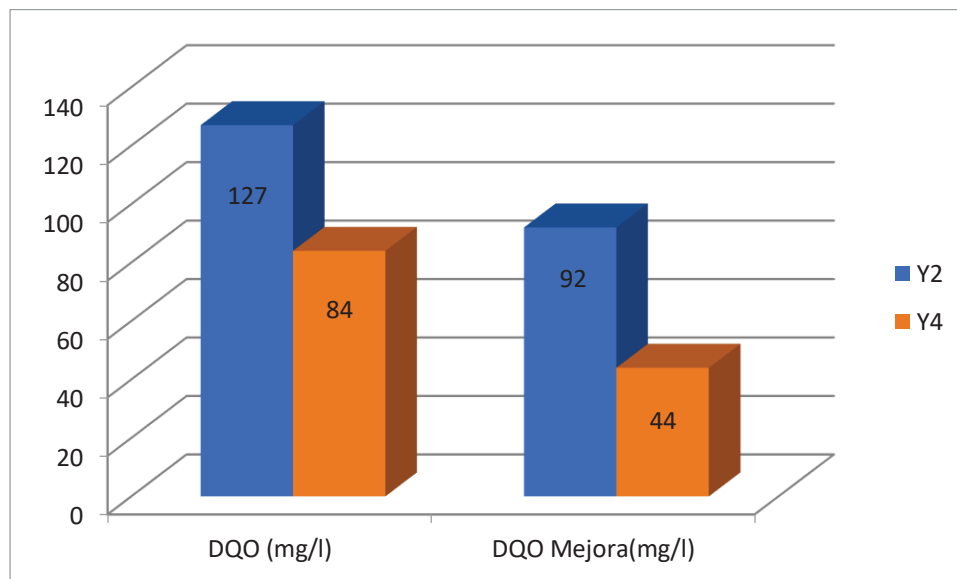


Figura 22. Comparación de los valores de DQO obtenidos en los tratamientos Y₂ Y₄. CONDICIONES DE CATALIZADOR: TiO₂: 3g; TiO₂+Cdots: 3g

En base a las figuras presentadas anteriormente, se puede diferenciar claramente el efecto del uso de TiO₂ dopado, pues en estos tratamientos, el DQO presentó una reducción mayor, tanto en los tratamientos definidos como en las condiciones de mejora.

En las Tablas 17 y 18 se presenta el resultado del cálculo determinado para el porcentaje de remoción, teniendo como valor inicial 300 mg/l.

Tabla 17.

Porcentaje de reducción de DQO después de los tratamientos

Tratamientos	DQO (mg/l)	%REDUCCION
Y1	200	33.33
Y2	127	57.67
Y3	112	62.67
Y4	84	72.00

De estos tratamientos el mayor porcentaje de remoción se presentó en Y₄ donde se utilizó 3g de TiO₂ dopado.

Tabla 18.

Porcentaje de reducción de DQO después de los tratamientos de mejora

Tratamientos	DQO (mg/l)	%REDUCCION
Y1	102	66.00
Y2	92	69.33
Y3	77	74.33
Y4	44	85.33

De los tratamientos de mejora, el mayor porcentaje de remoción se presentó en Y₄ donde se utilizó 3g de TiO₂ dopado y 0.6ml de H₂O₂.

Comparando los mejores resultados de los tratamientos y de los obtenido de la mejora donde se utiliza un oxidante que corresponde al H₂O₂, es posible ver que este último presenta un mayor porcentaje de remoción con un 13.3% superior a un tratamiento con las mismas características, pero sin el uso de un agente oxidante.

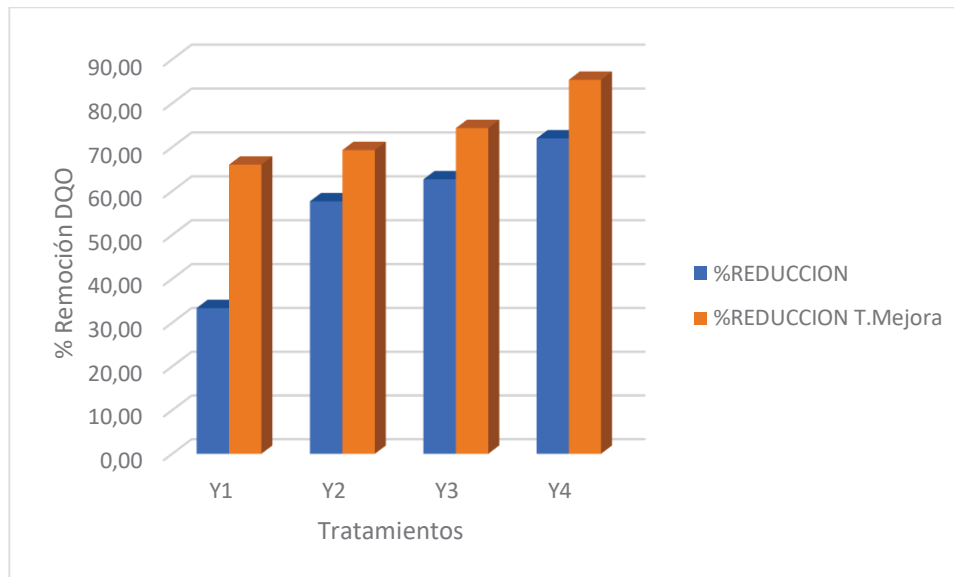


Figura 23. Comparación de los porcentajes de remoción de DQO

La eficiencia de remoción de DQO es mayor en los tratamientos de mejora donde se utiliza catalizador dopado y H₂O₂ como agente oxidante.

4.1.4 Turbidez

En la figura 24, se presenta una gráfica comparativa de los valores de turbidez inicial y final de las muestras con el fin de observar el cambio después de someter las muestras a los tratamientos de fotocatalisis.

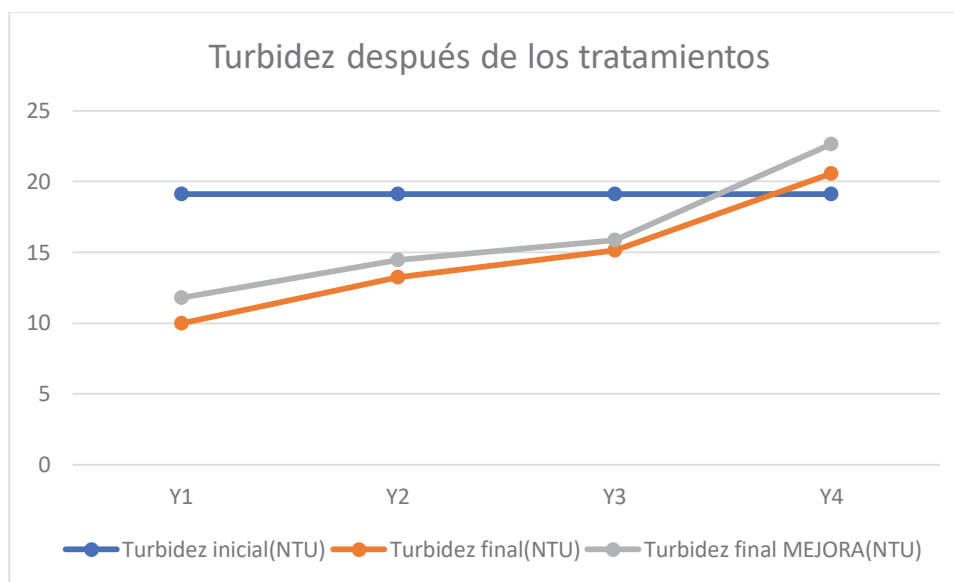


Figura 24. Valores de turbidez inicial y final posterior a los tratamientos

Tabla 19.

Porcentaje de reducción de turbidez después de los tratamientos

Tratamientos	Turbidez (NTU)	%REDUCCION
Y1	10	47,64
Y2	13,25	30,63
Y3	15,15	20,68
Y4	20,55	-7,59

Tabla 20.

Porcentaje de reducción de turbidez después de los tratamientos de mejora

Tratamientos	Turbidez (NTU)	%REDUCCION
Y5	11,8	38,22
Y6	14,45	24,35
Y7	15,85	17,02
Y8	22,65	-18,59

Los valores más altos de reducción se presentan en los tratamientos donde se utiliza el catalizador sin dopaje de puntos de carbono Y₁ y Y₅.

4.1.5 Potencial Oxido-Reducción

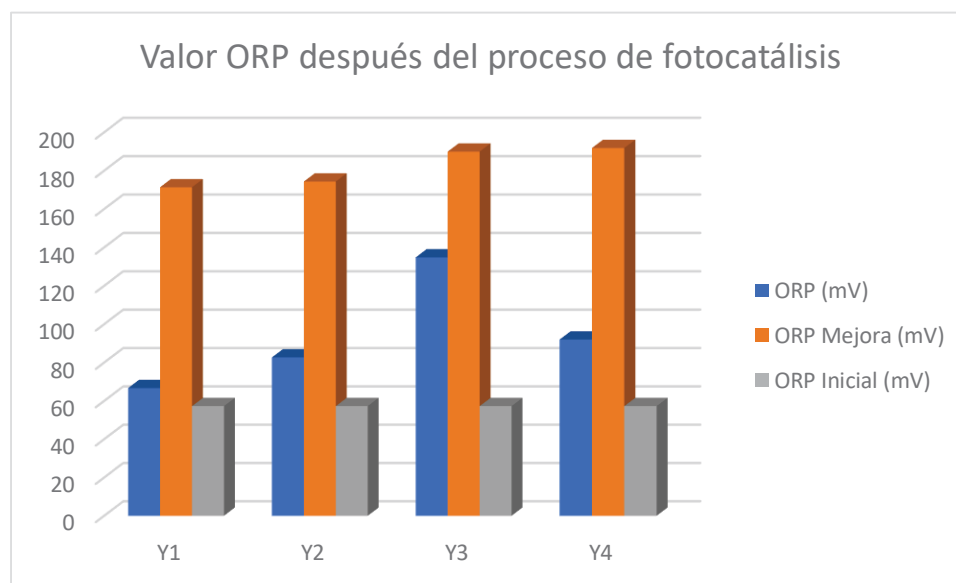


Figura 25. Valores reportados de ORP después de aplicados los tratamientos de fotocatalisis heterogénea

En todos los tratamientos, el valor del potencial oxidación-reducción aumentó considerablemente, especialmente en los tratamientos donde se usó un agente

oxidante, por este motivo, su presencia se observa por el aumento del valor y por su signo positivo.

4.1.6 Absorbancia

Para poder observar la reducción del valor de absorbancia de las muestras, se presenta la Figura 26, donde se muestran los valores iniciales de la muestra y los valores posteriores a la fotocatalisis.

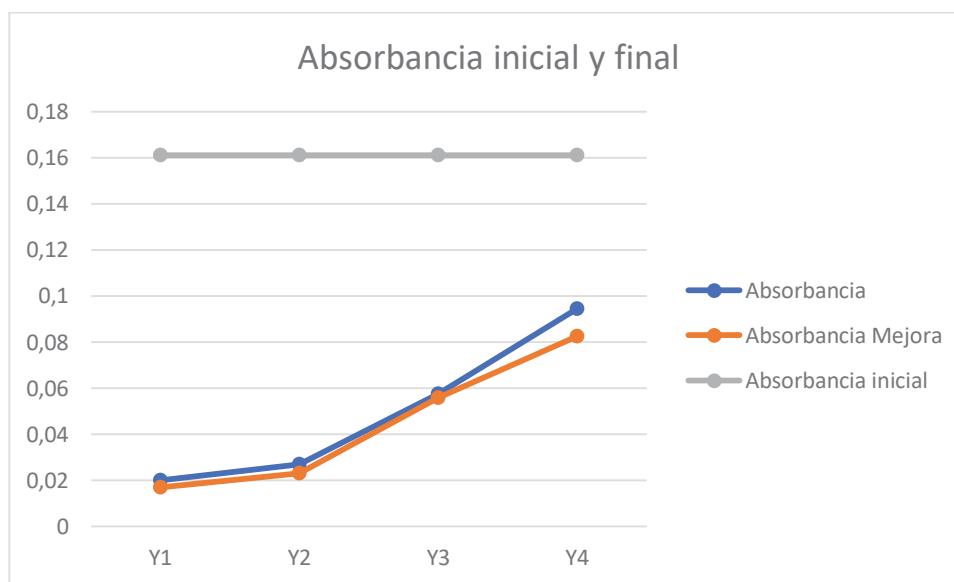


Figura 26. Valores de absorbancia inicial y posterior a los tratamientos

Tabla 21.

Porcentaje de reducción de absorbancia después de los tratamientos

Tratamientos	Absorbancia	%REDUCCION
Y1	0,02	87,58
Y2	0,027	83,23
Y3	0,058	64,29
Y4	0,095	41,30

Tabla 22.

Porcentaje de reducción de absorbancia después de los tratamientos de mejora

Tratamientos	Absorbancia	%REDUCCION
Y1	0,017	89,44
Y2	0,023	85,71
Y3	0,056	65,22
Y4	0,083	48,76

Para observar la variación en el porcentaje de reducción de absorbancia con el uso de catalizador con dopaje de puntos de carbono y sin el mismo, se presentan las Figuras 27 y 28.

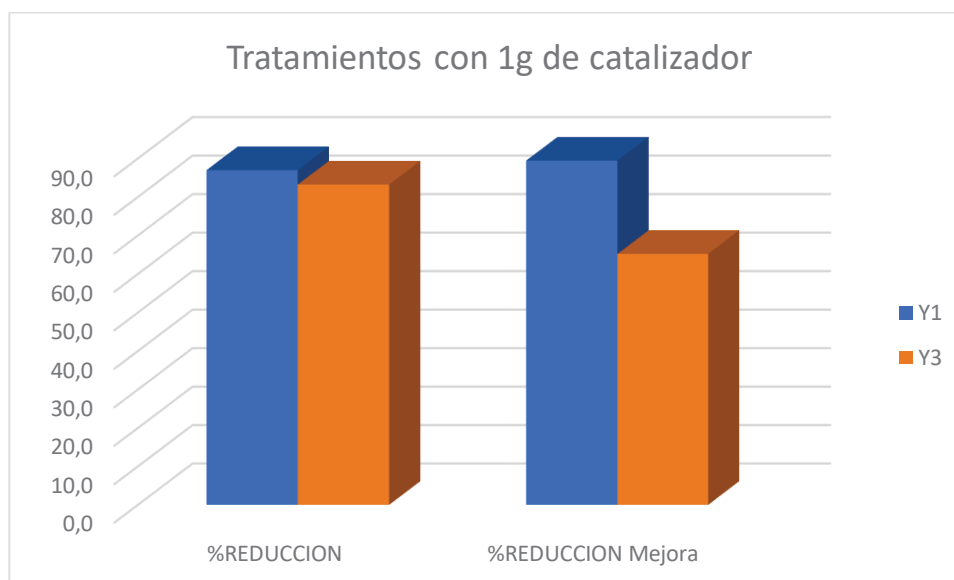


Figura 27. Porcentaje de reducción de absorbancia en los tratamientos con y sin H₂O₂ utilizando 1 g de catalizador

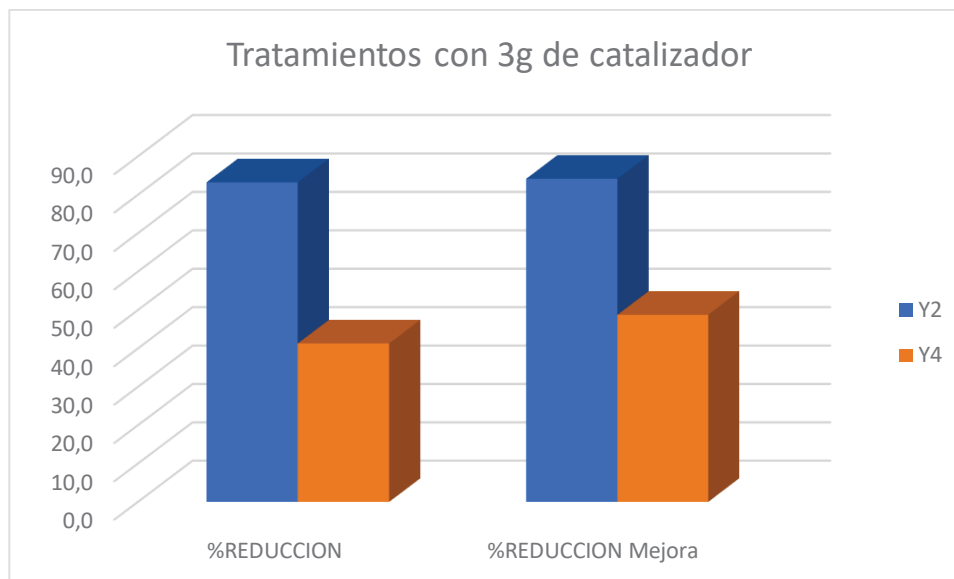


Figura 28. Porcentaje de reducción de absorbancia en los tratamientos con y sin H_2O_2 utilizando 3 g de catalizador

Los tratamientos que tuvieron un mayor porcentaje de reducción de absorbancia son aquellos en los que se utilizó 1g de TiO_2 sin puntos de carbono, pues se alcanzó un 87.58% de remoción y 89.44% utilizando H_2O_2 .

4.1.7 Tensoactivos

Los tensoactivos analizados fueron los de tipo Aniónico y No Iónico, pues son estos los más producidos y consumidos a nivel mundial.

4.1.7.1 Tensoactivos Aniónicos

En las figuras 29 y 30 se evidencia que existe una reducción de la cantidad de tensoactivos aniónicos tanto en los tratamientos sin un agente oxidante como con la adición de este. Existe un valor igual para la concentración de estos tensoactivos en los tratamientos Y_2 y Y_3 en ambos tipos de tratamiento.

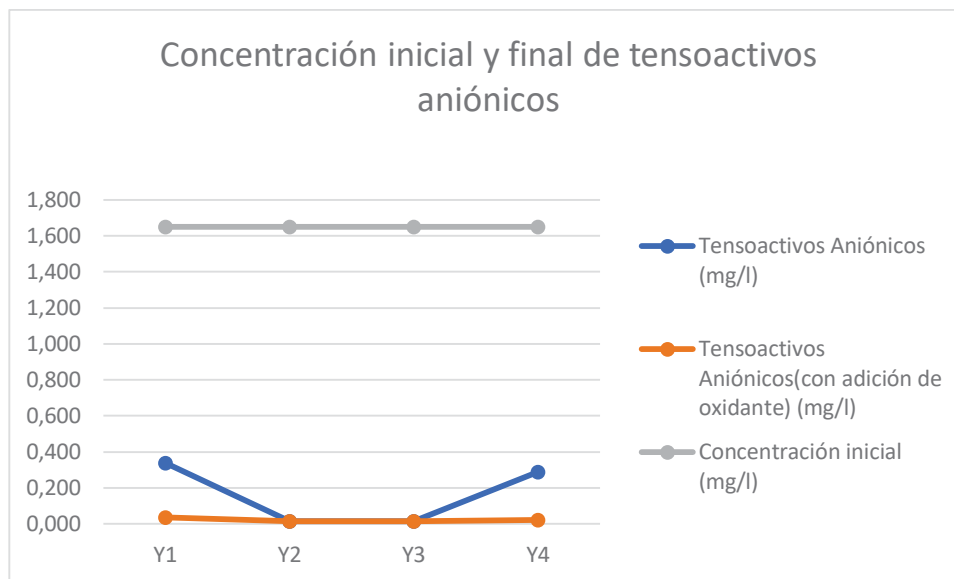


Figura 2239. Valores de concentración inicial y final de tensoactivos aniónicos

Los tratamientos Y_1 y Y_4 en donde no se utilizó el oxidante H_2O_2 presentaron las mayores concentraciones de tensoactivo.

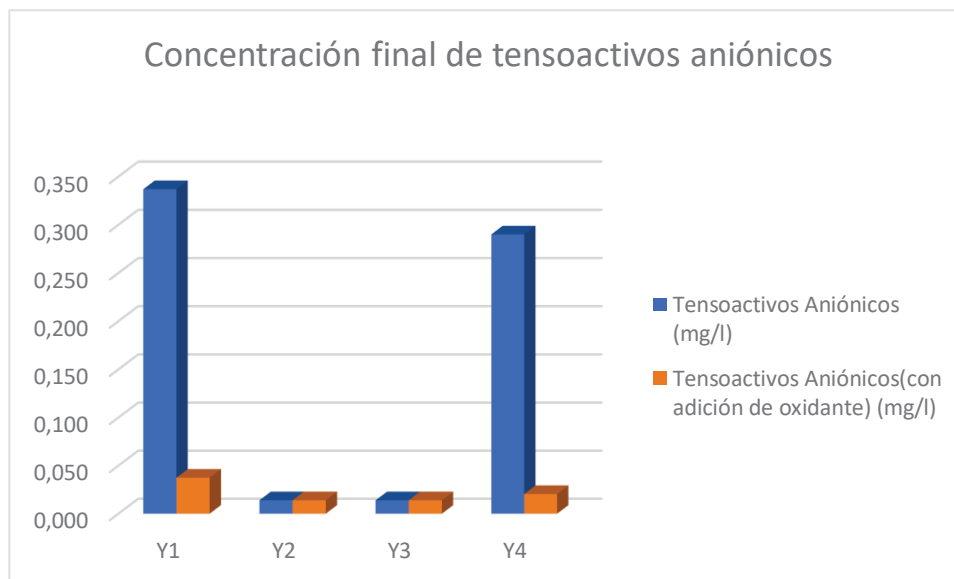


Figura 30. Variación de la concentración de tensoactivos aniónicos posterior a tratamientos de fotocatalisis

En la tabla 23 y 24 se muestran los porcentajes de reducción de los tratamientos definidos en el diseño experimental sin y con el uso del agente oxidante.

Tabla 23.

Porcentaje de reducción de tensoactivos aniónicos después de los tratamientos

Tratamientos	Tensoactivos Aniónicos (mg/l)	%REDUCCION
Y1	0,337	79,58
Y2	0,014	99,15
Y3	0,014	99,15
Y4	0,29	82,42

Tabla 24.

Porcentaje de reducción de tensoactivos aniónicos después de los tratamientos de mejora

Tratamientos	Tensoactivos Aniónicos (mg/l)	%REDUCCION
Y5	0,0375	97,73
Y6	0,014	99,15
Y7	0,014	99,15
Y8	0,0205	98,76

El tratamiento con menor eficiencia fue Y₁ en donde se utiliza 1g de TiO₂. En los tratamientos Y₂, Y₃, Y₆ y Y₇ mostraron los mejores resultados en cuanto a la remoción de tensoactivos aniónicos mostrando una eficiencia de 99.15%. Los tratamientos con 1g de TiO₂ dopado mostraron igual resultado que en los tratamientos donde se utilizó 3 g de TiO₂ sin la presencia de puntos de carbono.

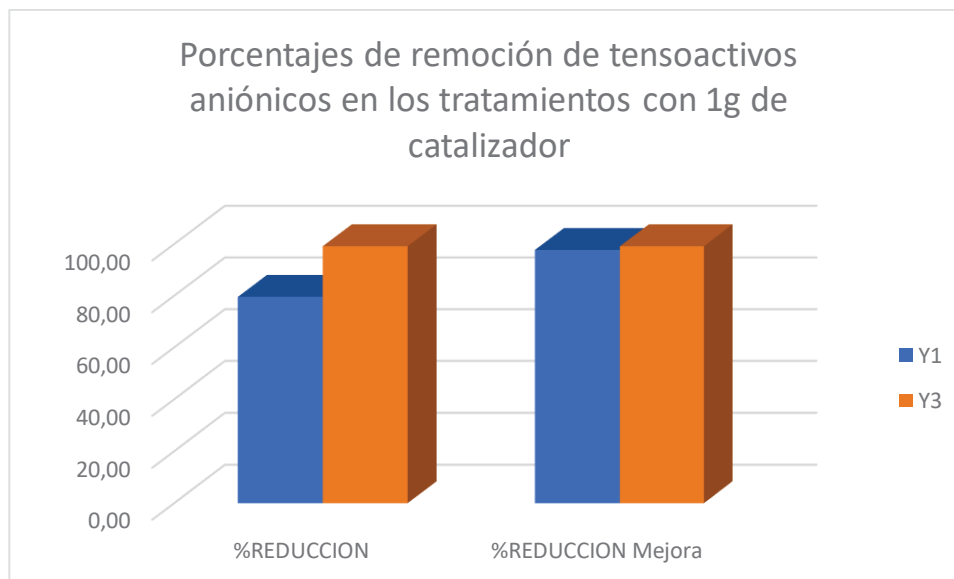


Figura 31. Comparación de porcentajes de remoción en los tratamientos en base al uso de 1g de catalizador

En la Figura 31, es posible observar que la adición de puntos de carbono potencia la mineralización de los tensoactivos aniónicos, sin embargo, con el uso de un oxidante la diferencia entre el uso de TiO_2 con y sin dopaje es mínima pues solamente hay una diferencia de 1.42% del uso de puntos de carbón con el catalizador sobre el uso de catalizador de grado técnico.

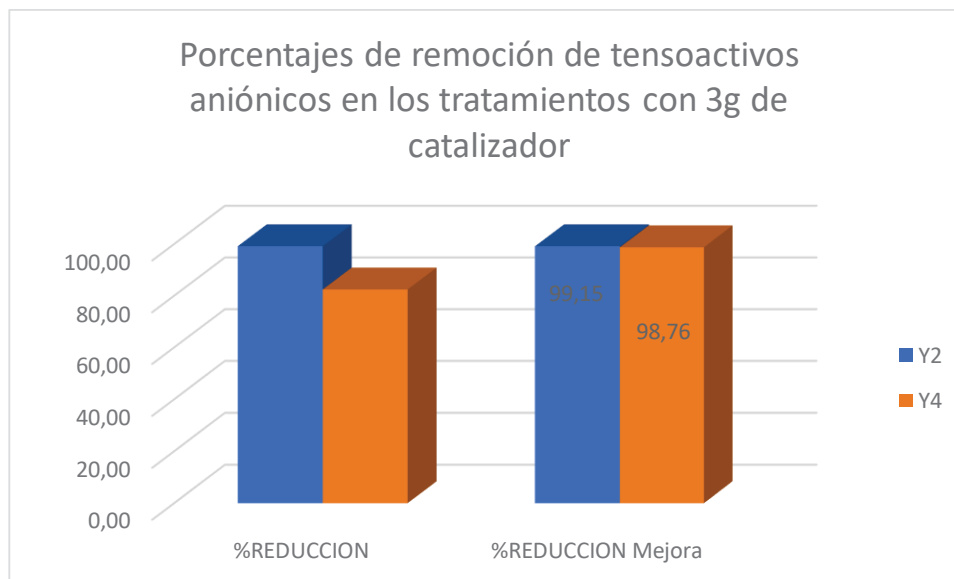


Figura 32. Comparación de porcentajes de remoción en los tratamientos en base al uso de 3g de catalizador

Por el contrario, con el uso de 3g de TiO_2 , los tratamientos con mayor efectividad resultaron ser aquellos donde solamente se utilizó el catalizador comercial sin los puntos de carbono. Esto puede deberse a que la coloración adquirida del TiO_2 afectó el paso de luz de catalizador y por ende la cantidad de fotones disponibles necesarios para el proceso de mineralización.

4.1.7.2 Tensoactivos No Iónicos

En las figuras 33 y 34 se evidencia que existe una reducción de la cantidad de tensoactivos no iónicos tanto en los tratamientos sin un agente oxidante como con la adición de este.

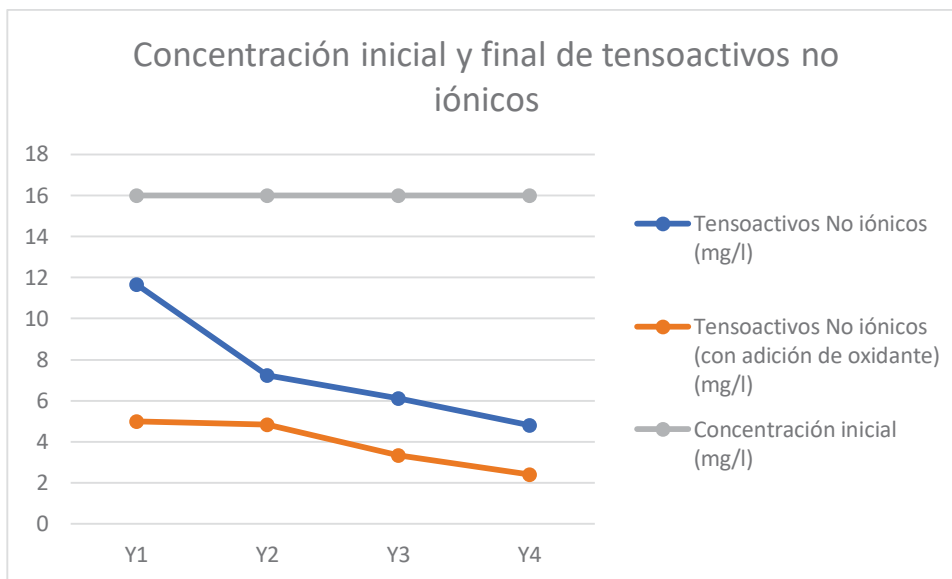


Figura 33. Valores de concentración inicial y final de tensoactivos no iónicos

El tratamiento Y₄ en donde se utilizó el oxidante H₂O₂ presentó la concentración de tensoactivo más bajo.

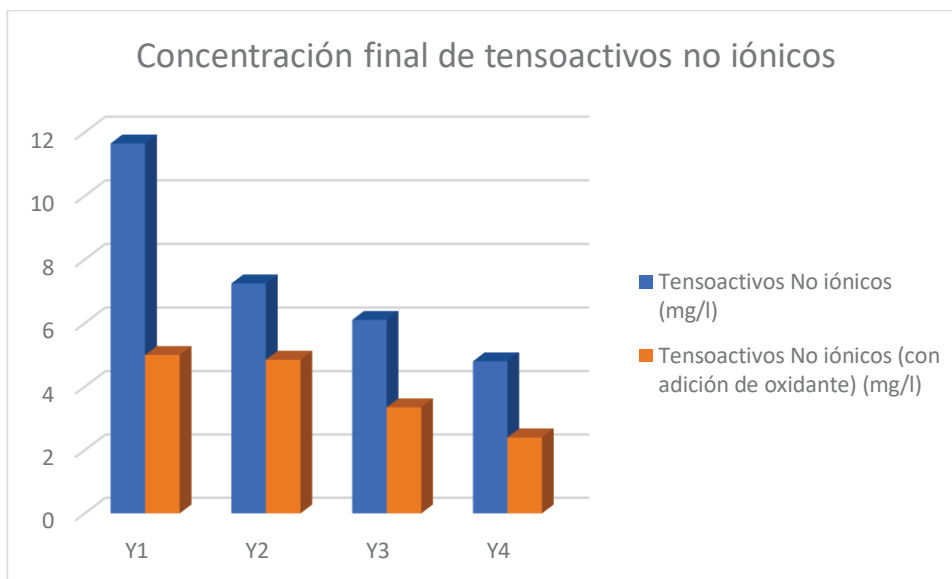


Figura 34. Variación de la concentración de tensoactivos no iónicos posterior a tratamientos de fotocatalisis

En las Tabla 25 y 26 se muestran los porcentajes de reducción de los tratamientos definidos en el diseño experimental y con el uso del agente oxidante.

Tabla 25.

Porcentaje de reducción de tensoactivos No iónicos después de los tratamientos

Tratamientos	Tensoactivos No iónicos (mg/l)	%REDUCCION
Y1	11,65	27,19
Y2	7,25	54,69
Y3	6,1	61,88
Y4	4,8	70,00

Tabla 26.

Porcentaje de reducción de tensoactivos No iónicos después de los tratamientos de mejora

Tratamientos	Tensoactivos No iónicos (mg/l)	%REDUCCION
Y1	5	68,75
Y2	4,85	69,69
Y3	3,35	79,06
Y4	2,4	85,00

Tanto en los tratamientos definidos en la Tabla 25 como aquellos de la Tabla 26, en donde se añadió H_2O_2 , se puede observar que el porcentaje de remoción aumenta con el uso de mayor cantidad del fotocatalizador TiO_2 y se presenta una menor cantidad de tensoactivos no iónicos si se utiliza TiO_2 dopado con puntos de carbón.

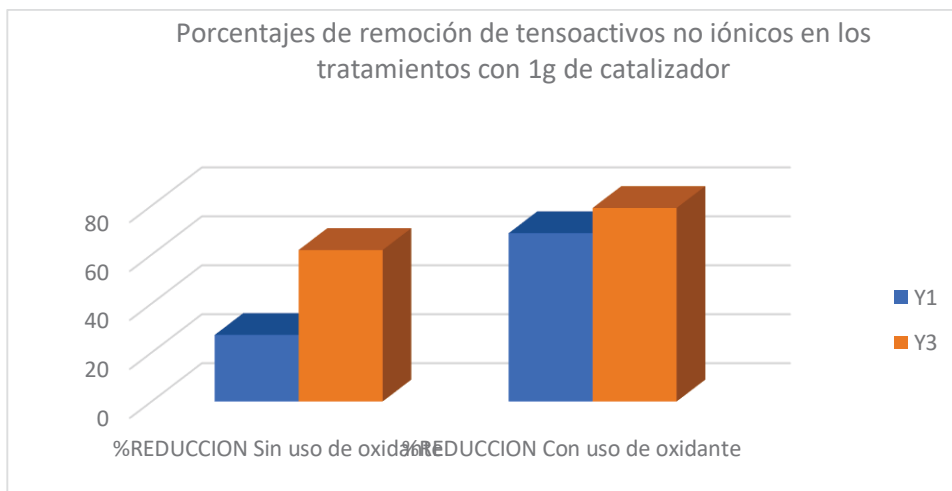


Figura 35. Comparación de porcentajes de remoción de tensoactivos no iónicos en los tratamientos en base al uso de 1g de catalizador

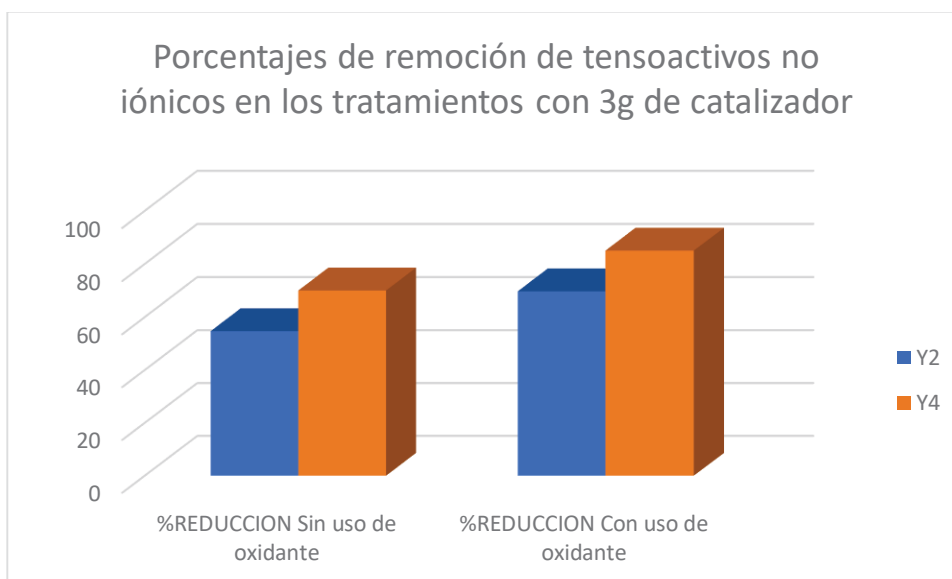


Figura 36. Comparación de porcentajes de remoción de tensoactivos no iónicos en los tratamientos en base al uso de 3g de catalizador

En las Figuras 35 y 36, es posible observar que la adición de puntos de carbono y el uso de un oxidante permite una mayor reducción de tensoactivos de carácter no iónico.

4.2 Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico de los tratamientos aplicados y las variables respuesta analizados en este trabajo, se utilizó el software estadístico Minitab18 en donde se realizó un análisis de varianzas y un análisis de diseño factorial 2^2 que corresponde al diseño experimental definido. Para determinar la existencia de una diferencia significativa en el análisis de varianzas, se define las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula: Todas las medias son iguales ($p > 0.05$)

Hipótesis alternativa: No todas las medias son iguales ($p < 0.05$)

4.2.1 pH

Tabla 27.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de pH en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	6.854	2.2846	4.58	0.088	60.55%
<i>Error</i>	4	1.995	0.4988			
<i>Total</i>	7	8.849				

El valor de R^2 ajustado es de 0.6 lo que indica que los valores se ajustan al modelo y el valor p es mayor que el valor de nivel de significancia por lo que se acepta la hipótesis nula. Estos dos valores muestran que no existe una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre el pH de las muestras.

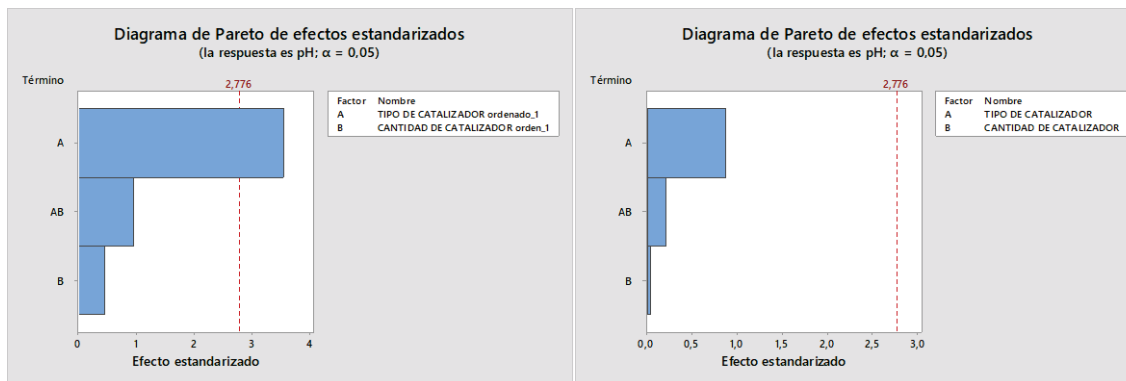
Tabla 28.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de pH en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea añadiendo un agente oxidante

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p	R-cuad.(ajustado)
		Ajust.	Ajust.			
<i>Tratamientos</i>	3	0.584	0.195	0.27	0.843	0%
<i>Error</i>	4	2.855	0.714			
<i>Total</i>	7	3.439				

El valor de R^2 ajustado es de 0 lo que indica que los valores no se ajustan al modelo y el valor p es mayor que el valor de nivel de significancia por lo que se acepta la hipótesis nula. Estos dos valores muestran que no existe una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre el pH de las muestras.

En la Figura 37 se presenta el diagrama de Pareto que muestra los factores que poseen la mayor significancia sobre las variables respuestas especificadas.



a)

b)

Figura 37. Diagrama de Pareto de los efectos sobre el pH de las muestras.

a) Tratamientos sin un agente oxidante;
b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

El diagrama anterior muestra que en los tratamientos donde no se añadió H_2O_2 , el mayor efecto sobre la variación de pH tiene el tipo de catalizador que se utilice. En el caso donde sí se utilizó un oxidante, ninguno de los factores presentó un efecto significativo sobre el valor del pH final de las muestras.

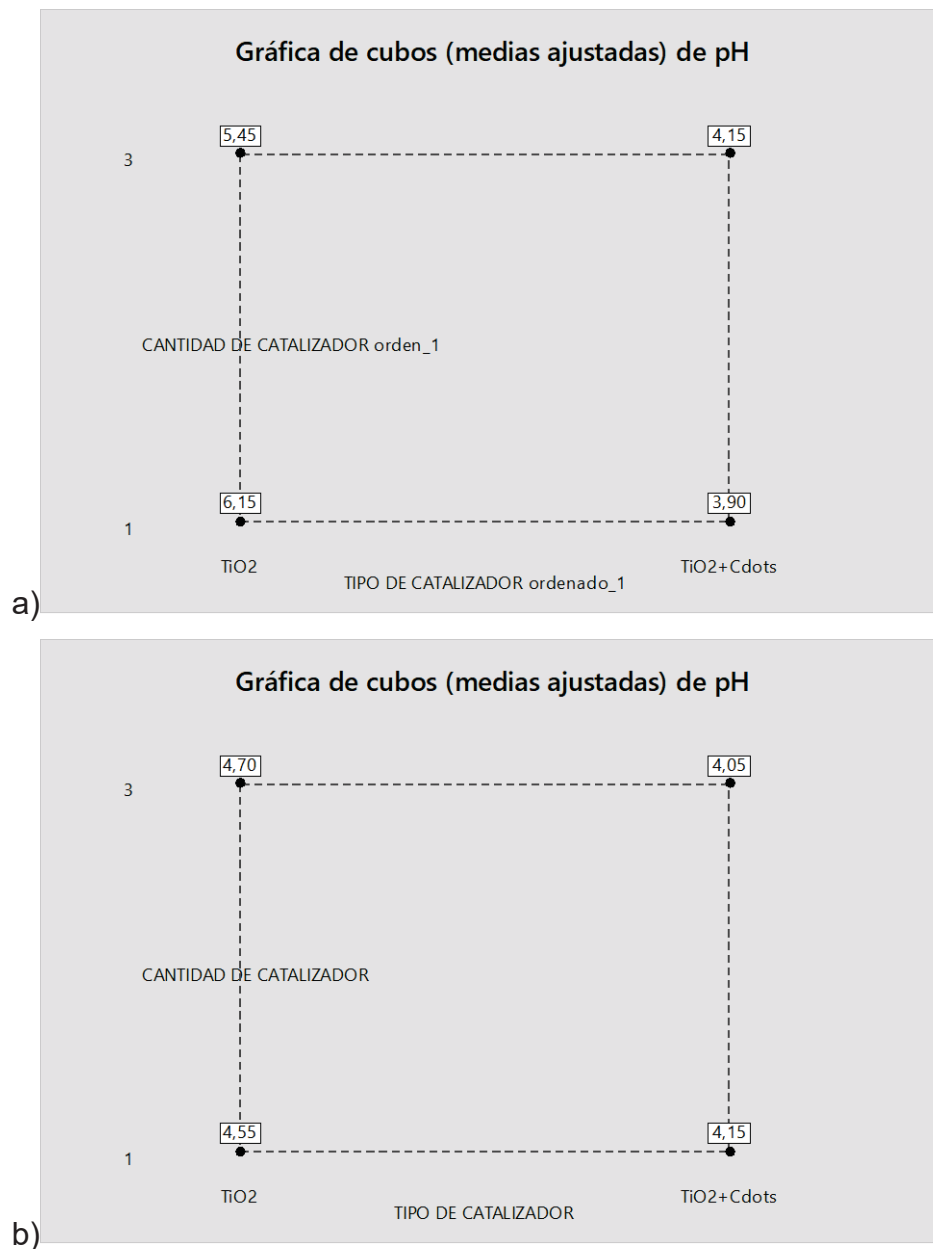


Figura 38. Gráfico de cubos a partir de las medias ajustadas de los valores de pH de los tratamientos. a) Tratamientos sin un agente oxidante; b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

En la Figura 38 se observa que, para obtener un valor de pH que cumpla con la normativa ambiental vigente se necesita 1 g de TiO_2 en el caso de no utilizar un

oxidante. En cambio, con el uso de un agente oxidante, ningún tratamiento permite alcanzar el valor de la normativa, aunque el valor que más se acerca es de 4.55 con 3g de TiO₂.

4.2.2 Conductividad

Tabla 29.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de conductividad en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	1.0685	0.3561	25.30	0.005	91.24%
<i>Error</i>	4	0.0563	0.0141			
<i>Total</i>	7	1.1248				

El valor de R² ajustado es de 0.91 lo que indica que los valores se ajustan al modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Estos dos valores muestran que existe una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la conductividad de las muestras.

Tabla 30.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de conductividad en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea añadiendo un agente oxidante

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	0.077	0.026	1.6	0.322	20.46%
<i>Error</i>	4	0.064	0.016			
<i>Total</i>	7	0.141				

El valor de R^2 ajustado es de 0.2 lo que indica que los valores no se ajustan al modelo y el valor p es mayor que el valor de nivel de significancia por lo que se acepta la hipótesis nula. Estos dos valores muestran que no existe una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la conductividad de las muestras.

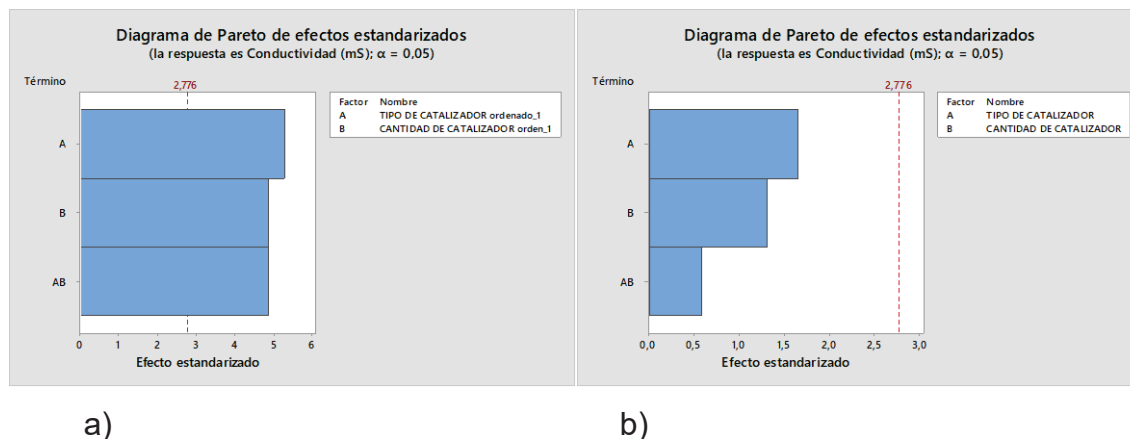


Figura 39. Diagrama de Pareto de los efectos de los factores establecidos sobre la conductividad de las muestras.
 a) Tratamientos sin un agente oxidante;
 b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

El diagrama anterior muestra que tanto el tipo de catalizador, la cantidad de este y su combinación, tiene un efecto significativo sobre los valores de conductividad posterior a los tratamientos sin añadir un oxidante. En cambio, en los tratamientos donde se utilizó peróxido de hidrógeno, ninguno de los factores tiene un efecto significativo sobre el valor de la conductividad.

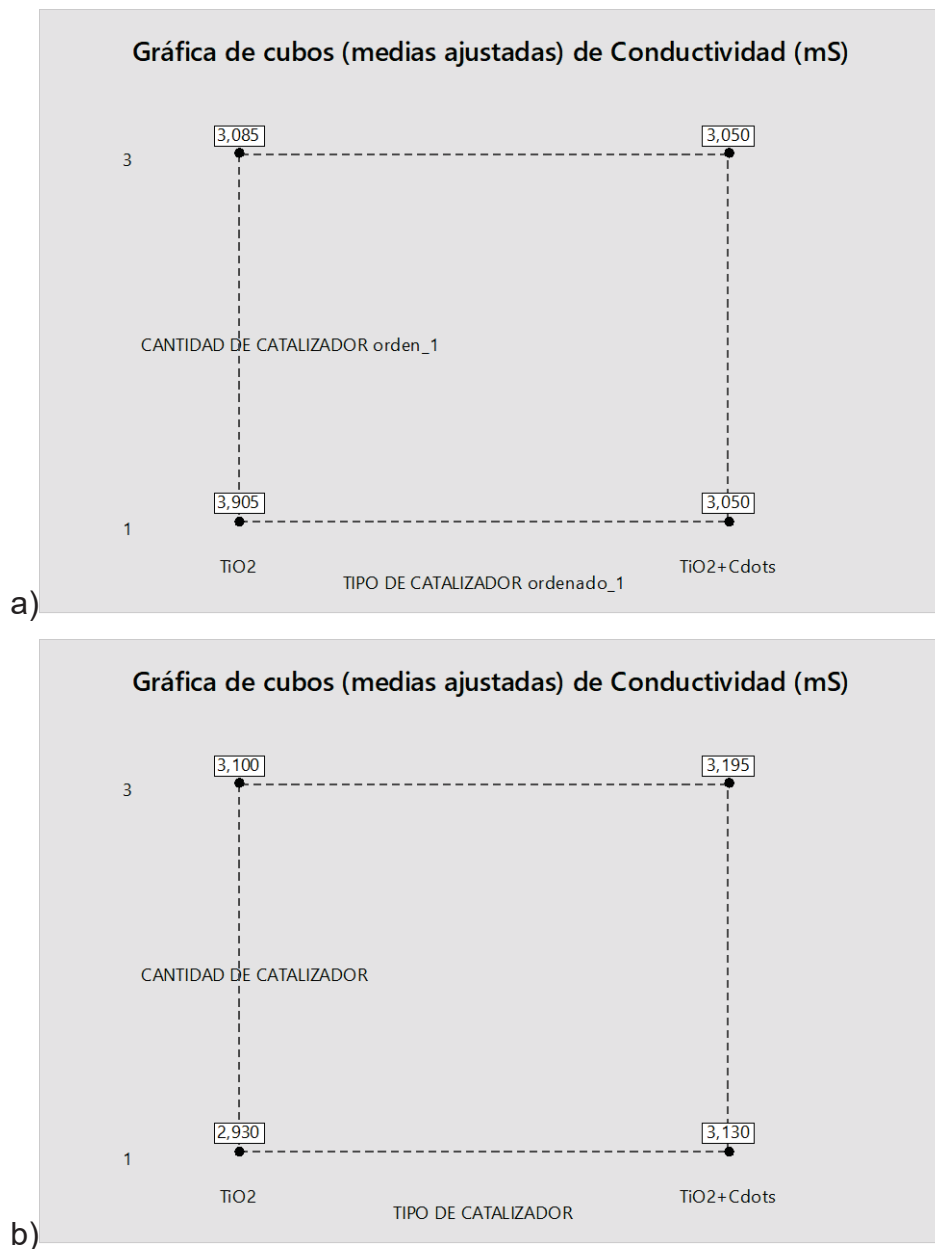


Figura 40. Gráfico de cubos a partir de las medias ajustadas de los valores de conductividad de los tratamientos.

a) Tratamientos sin un agente oxidante;

b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

En la Figura 40 (a) se observa que, para obtener el valor más alto de conductividad se necesitó de 1g de TiO₂ y los valores más bajos se obtuvieron

con el uso de TiO₂+Cdots con 1 y 3 gramos. En cambio, en la figura (b) se presentan valores similares con el uso de 3g de TiO₂ y 1g de TiO₂+Cdots. El mayor valor de conductividad se presentó en el tratamiento con 3g de TiO₂+Cdots.

4.2.3 DQO

Tabla 31.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de la demanda química de oxígeno en los tratamientos de fotocátalisis heterogénea

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
Tratamientos	3	14787.4	4929.13	876.29	0.000	99.73%
Error	4	22.5	5.63			
Total	7	14809.9				

El valor de R² ajustado es de 0.99 lo que indica que los valores tienen un alto ajuste para este modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis.

Estos dos valores muestran que existe una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la demanda química de oxígeno de las muestras.

Tabla 32.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de la demanda química de oxígeno en los tratamientos de fotocátalisis heterogénea añadiendo un agente oxidante.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
Tratamientos	3	3857.37	1285.79	791.26	0.000	99.71%

Error	4	6.5	1.62
Total	7	3863.87	

El valor de R^2 ajustado es de 0.99 lo que indica que los valores tienen un alto ajuste para este modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Estos dos valores muestran que existe una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la demanda química de oxígeno de las muestras.

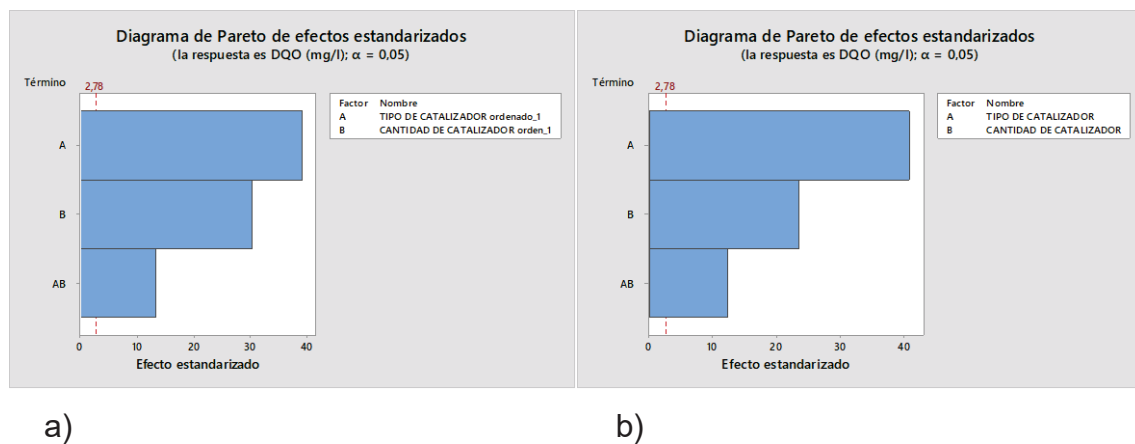


Figura 41. Diagrama de Pareto de los efectos de los factores establecidos sobre la Demanda química de oxígeno de las muestras.
a) Tratamientos sin un agente oxidante;
b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

El diagrama anterior, tanto en (a) como en (b) se muestra que el tipo de catalizador, la cantidad y la combinación de estos factores, tiene un efecto significativo sobre los valores de DQO obtenidos posterior a los tratamientos.

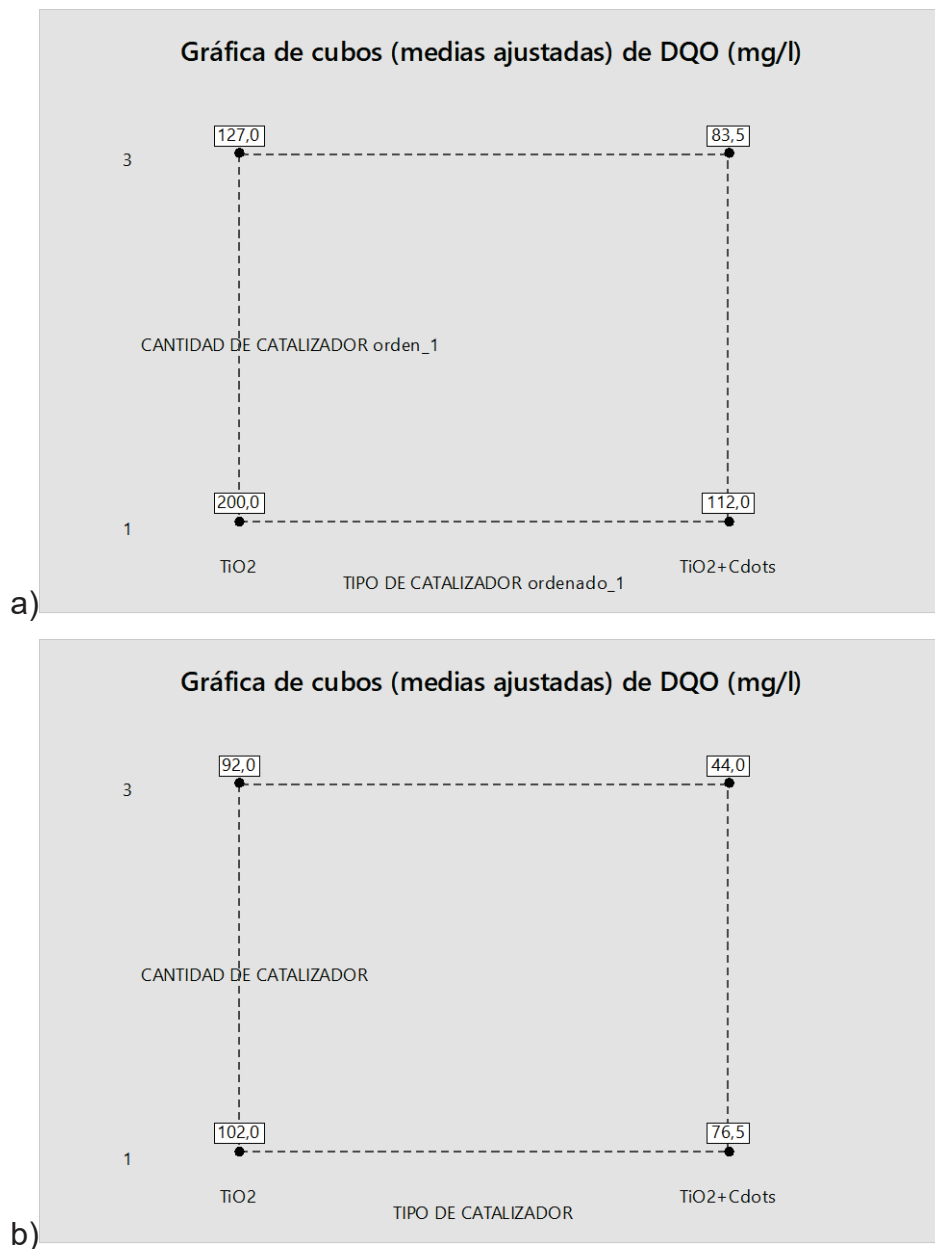


Figura 42. Gráfico de cubos a partir de las medias ajustadas de los valores de DQO de los tratamientos.

a) Tratamientos sin un agente oxidante;

b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

En la Figura 42 se puede observar que, en ambos casos, para mejorar el efecto de la fotocatalisis sobre la reducción de materia orgánica, se necesitó de 3g de catalizador dopado con puntos de carbono.

4.2.4 Turbidez

Tabla 33.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de turbidez en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	117.224	39.075	182.81	0.000	98.73%
<i>Error</i>	4	0.855	0.214			
<i>Total</i>	7	118.079				

El valor de R^2 ajustado es de 0.98 lo que indica que los valores tienen un alto ajuste para este modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis. Estos dos valores muestran que existe una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la turbidez de las muestras.

Tabla 34.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de turbidez en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea añadiendo un agente oxidante

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	128.294	42.765	239.24	0.000	99.03%
<i>Error</i>	4	0.715	0.179			
<i>Total</i>	7	129.009				

El valor de R^2 ajustado es de 0.99 lo que indica que los valores tienen un alto ajuste para este modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Estos dos valores muestran que existe una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la turbidez de las muestras.

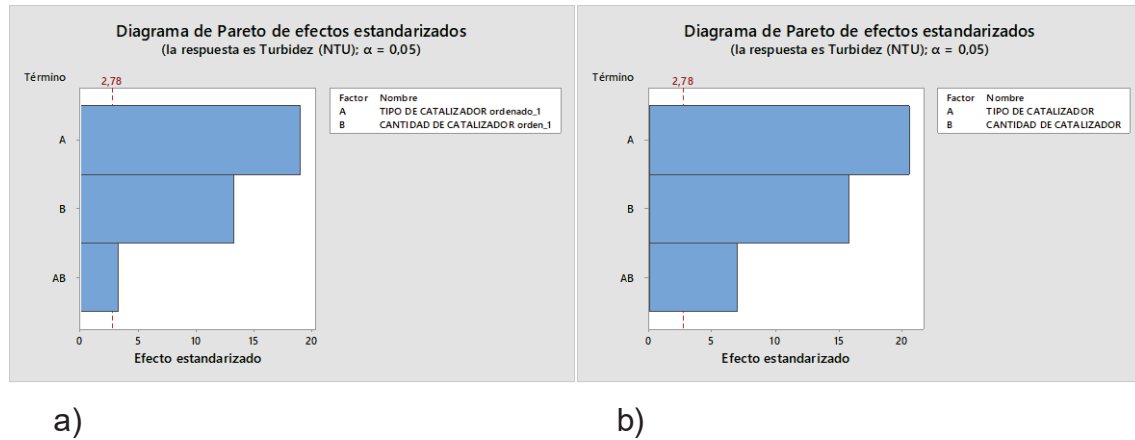


Figura 43. Diagrama de Pareto de los efectos de los factores establecidos sobre la Turbidez de las muestras.
a) Tratamientos sin un agente oxidante;
b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

El diagrama anterior muestra que el tipo de catalizador, la cantidad y la combinación de estos factores, tiene un efecto significativo sobre los valores de turbidez obtenidos posterior a los tratamientos de fotocátalisis tanto con el uso y no de un oxidante.

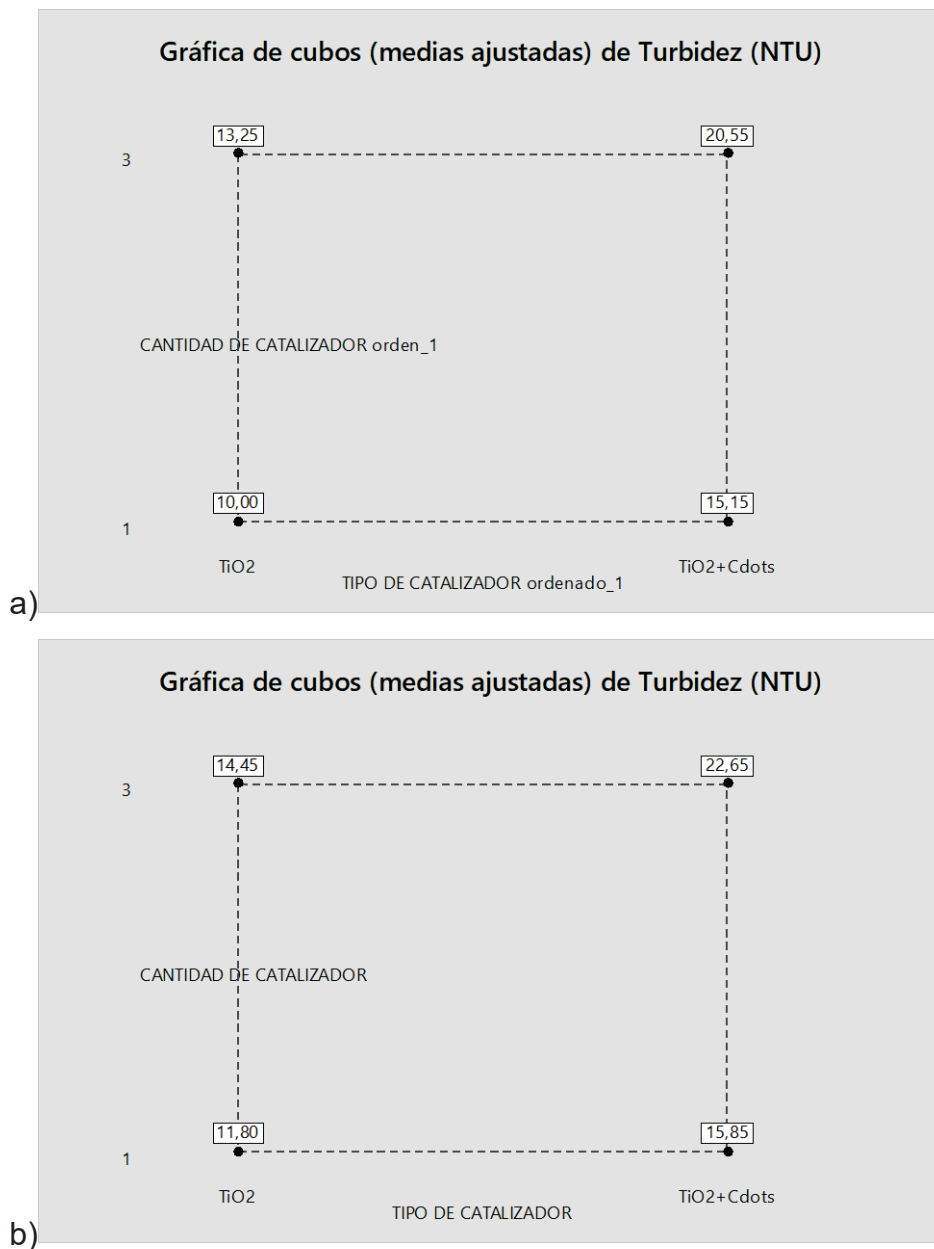


Figura 44. Gráfico de cubos a partir de las medias ajustadas de los valores de Turbidez de los tratamientos. a) Tratamientos sin un agente oxidante; b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

En la Figura 44 se puede observar que, para reducir la turbidez se puede usar solamente 1g de TiO_2 , lo que podría mejorar el paso de luz y por ende la actividad

fotocatalítica para la mineralización de contaminantes. En cambio, la turbidez es mayor si utiliza 3g TiO₂ dopado.

4.2.5 Potencial Oxido-Reducción

Tabla 35.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de ORP en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	5083	1694.4	2.00	0.256	30.00%
<i>Error</i>	4	3389	847.2			
<i>Total</i>	7	8472				

El valor de R² ajustado es de 0.3 lo que indica que los valores no se ajustan al modelo y el valor p es mayor que el valor de nivel de significancia por lo que se acepta la hipótesis nula que indica que todas las medias son iguales. Estos valores representan una diferencia significativa nula del efecto de los tratamientos sobre el Potencial de Oxidación-Reducción de las muestras.

Tabla 36.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de ORP en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea añadiendo un agente oxidante

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	660.6	220.2	1.75	0.296	24.23%
<i>Error</i>	4	504.4	126.1			
<i>Total</i>	7	1165.0				

El valor de R^2 ajustado es de 0.24 lo que indica que los valores no se ajustan al modelo y el valor p es mayor que el valor de nivel de significancia por lo que se acepta la hipótesis nula que indica que todas las medias son iguales. Estos valores representan una diferencia significativa nula del efecto de los tratamientos sobre el Potencial de Oxidación-Reducción de las muestras.

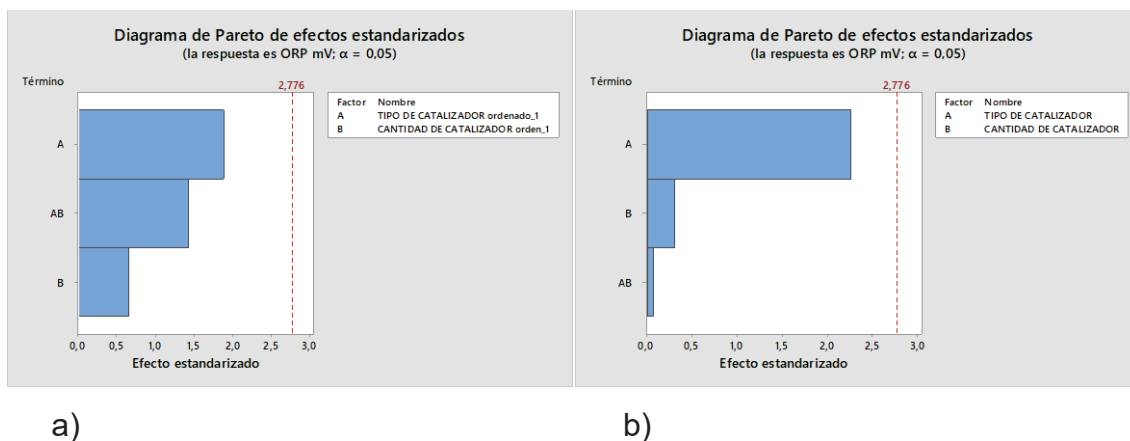


Figura 45. Diagrama de Pareto de los efectos de los factores establecidos sobre el Potencial Oxido-Reducción de las muestras.
 a) Tratamientos sin un agente oxidante;
 b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

El diagrama anterior muestra que ninguno de los factores tiene un efecto significativo sobre el valor del potencial oxido-reducción obtenido posterior a los tratamientos.

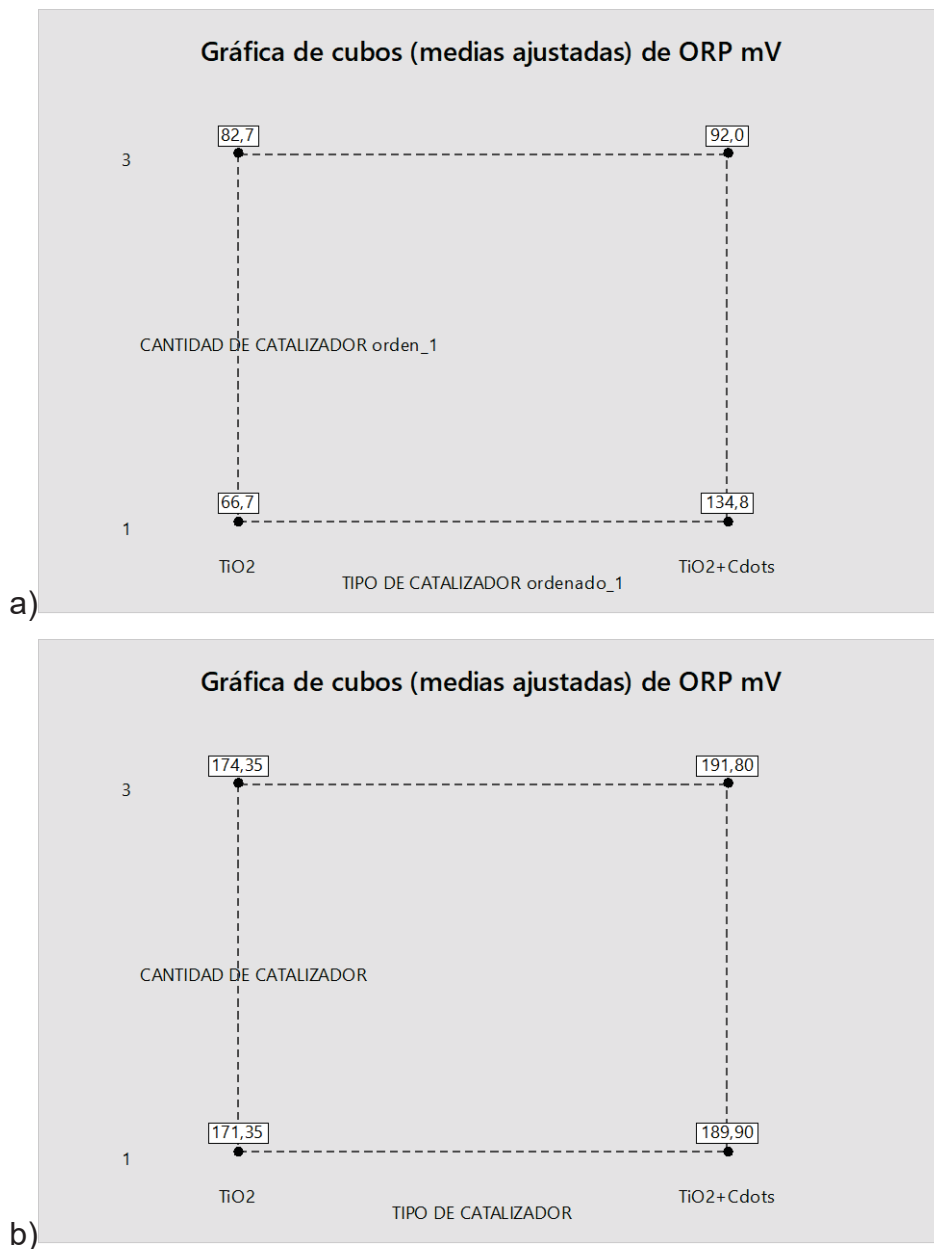


Figura 46. Gráfico de cubos a partir de las medias ajustadas de los valores de ORP de los tratamientos.

a) Tratamientos sin un agente oxidante;

b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

(a) A pesar de que no existen efectos significativos de los factores determinados en cada uno de los tratamientos sobre el Potencial Oxido-reductor, se puede

observar que el mayor valor fue el obtenido con el uso de 1g de TiO₂ dopado con puntos de carbono, este valor mayor indica que existe una mayor capacidad de oxidación de las sustancias contaminantes presentes en el agua. Se muestra un valor alto también con el uso de 3g de TiO₂ dopado con puntos de carbono. (b) En cambio en esta variante en los tratamientos, el valor mayor de ORP se presentó con el uso de 3g TiO₂ dopado con puntos de carbono.

4.2.6 Absorbancia

Tabla 37.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de absorbancia en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	0.007	0.0023	486.35	0.000	99.52
<i>Error</i>	4	0.00002	0.000005			
<i>Total</i>	7	0.00695				

El valor de R² ajustado es de 0.99 lo que indica que los valores tienen un ajuste alto al modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que indica que no todas las medias son iguales. Estos valores representan una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre el nivel de absorbancia de las muestras.

Tabla 38.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de absorbancia en los tratamientos de fotocatalisis heterogénea añadiendo un agente oxidante

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p	R-cuad.(ajustado)
		Ajust.	Ajust.			
<i>Tratamientos</i>	3	0.006	0.002	32.61	0.003	93.13
<i>Error</i>	4	0.0002	0.00006			
<i>Total</i>	7	0.0058				

El valor de R^2 ajustado es de 0.93 lo que indica que los valores tienen un ajuste alto al modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que indica que no todas las medias son iguales. Estos valores representan una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre el nivel de absorbancia de las muestras.

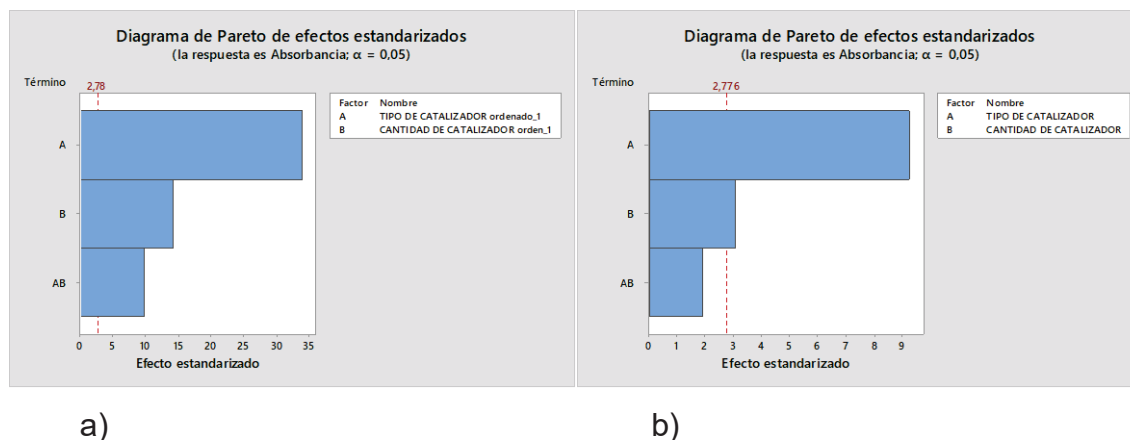


Figura 47. Diagrama de Pareto de los efectos de los factores establecidos sobre el valor de absorbancia de las muestras.
 a) Tratamientos sin un agente oxidante;
 b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

El diagrama anterior muestra que en (a), todos los factores tienen un efecto significativo sobre el valor de absorbancia obtenido posterior a los tratamientos de fotocatalisis. En cambio, en (b) tienen un efecto significativo sobre la absorbancia el tipo de catalizador y la cantidad, pero no la combinación de estos dos.

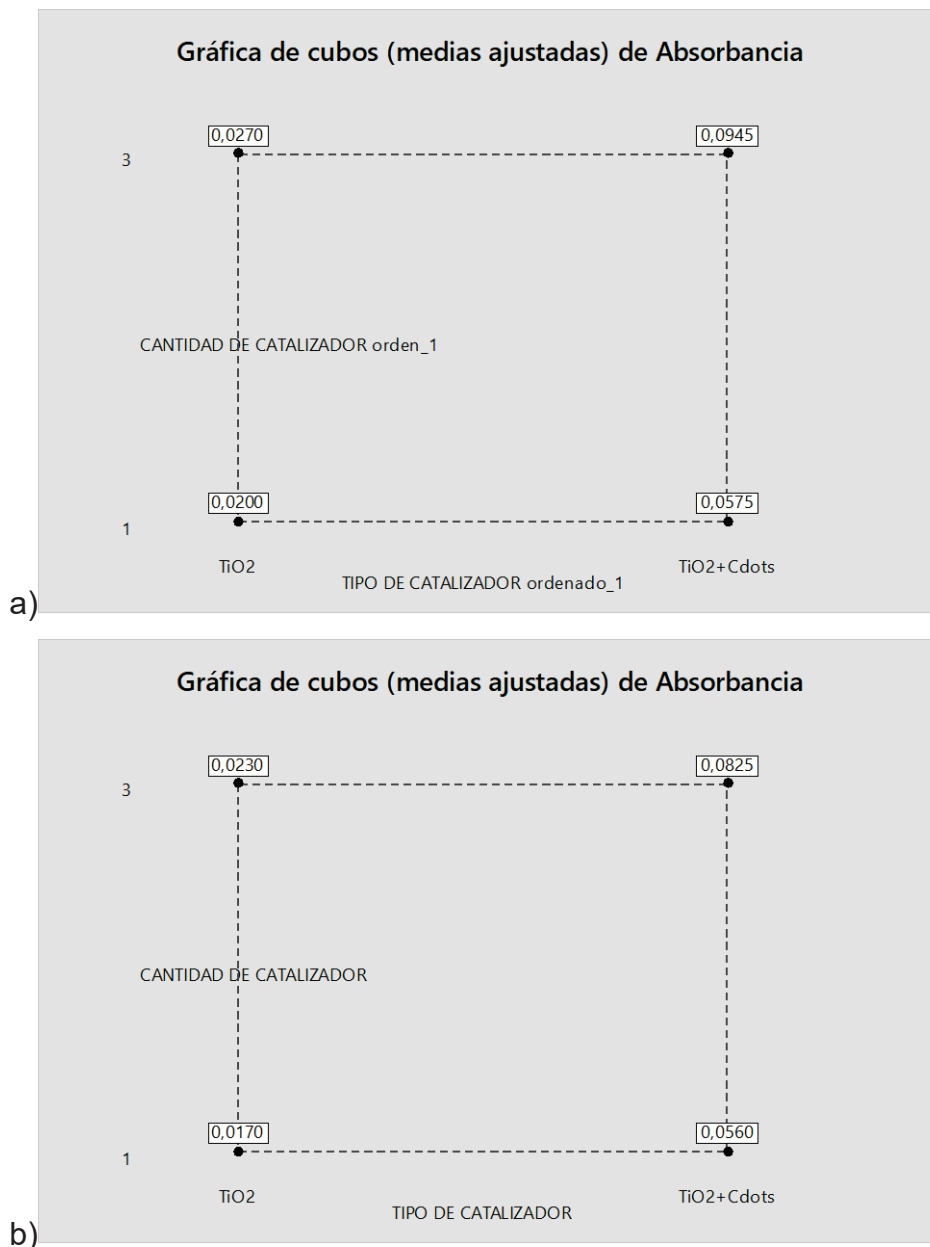


Figura 48. Gráfico de cubos a partir de las medias ajustadas de los valores de absorbancia de los tratamientos. a) Tratamientos sin un agente oxidante; b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

Todos los tratamientos presentaron una reducción de los valores de absorbancia, donde el menor valor de este se obtuvo al utilizar 1g de TiO_2 comercial y la menor

reducción en el caso de haber empleado 3g de TiO₂ dopado con puntos de carbono.

4.2.7 Tensoactivos Aniónicos

Tabla 39.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de tensoactivos aniónicos en los tratamientos de fotocátalisis heterogénea

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	0.1816	0.061	31.46	0.003	92.89%
<i>Error</i>	4	0.0077	0.002			
<i>Total</i>	7	0.1893				

El valor de R² ajustado es de 0.92 lo que indica que los valores tienen un ajuste alto al modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que indica que no todas las medias son iguales. Estos valores representan la existencia de una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la concentración de tensoactivos después de los procesos de fotocátalisis

Tabla 40.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de tensoactivos aniónicos en los tratamientos de fotocátalisis heterogénea añadiendo un agente oxidante

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	0.0007	0.0003	11.07	0.021	81.19%
<i>Error</i>	4	0.00009	0.00002			

Total	7	0.0008
-------	---	--------

El valor de R^2 ajustado es de 0.81 lo que indica que los valores se ajustan al modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que indica que no todas las medias son iguales. Estos valores representan la existencia de una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la concentración de tensoactivos aniónicos después de los procesos de fotocatalisis con presencia de un agente catalizador.

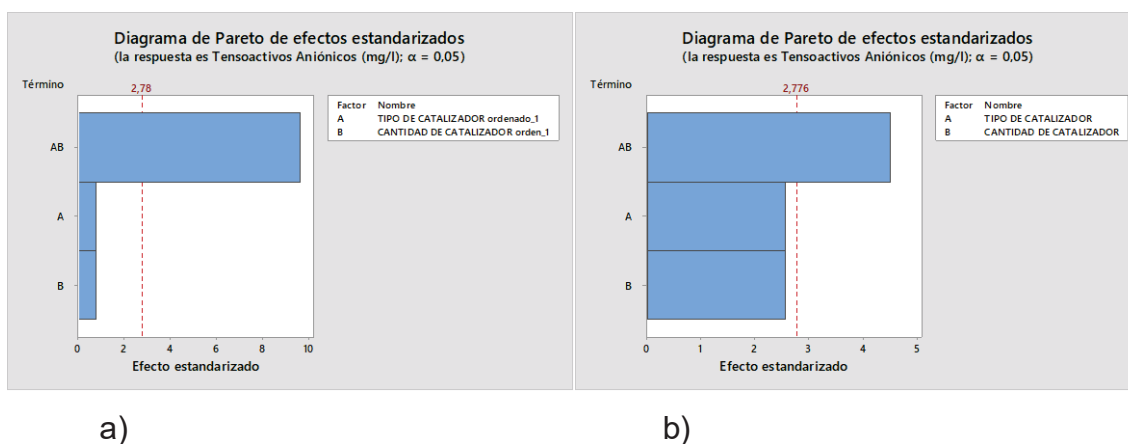


Figura 49. Diagrama de Pareto de los efectos de los factores establecidos sobre la concentración de tensoactivos aniónicos de las muestras.
a) Tratamientos sin un agente oxidante;
b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

El diagrama anterior muestra que ni el tipo de catalizador ni su concentración tienen un efecto significativo por separado sobre la reducción de tensoactivos aniónicos, pero si tiene un efecto significativo la combinación de estos factores.

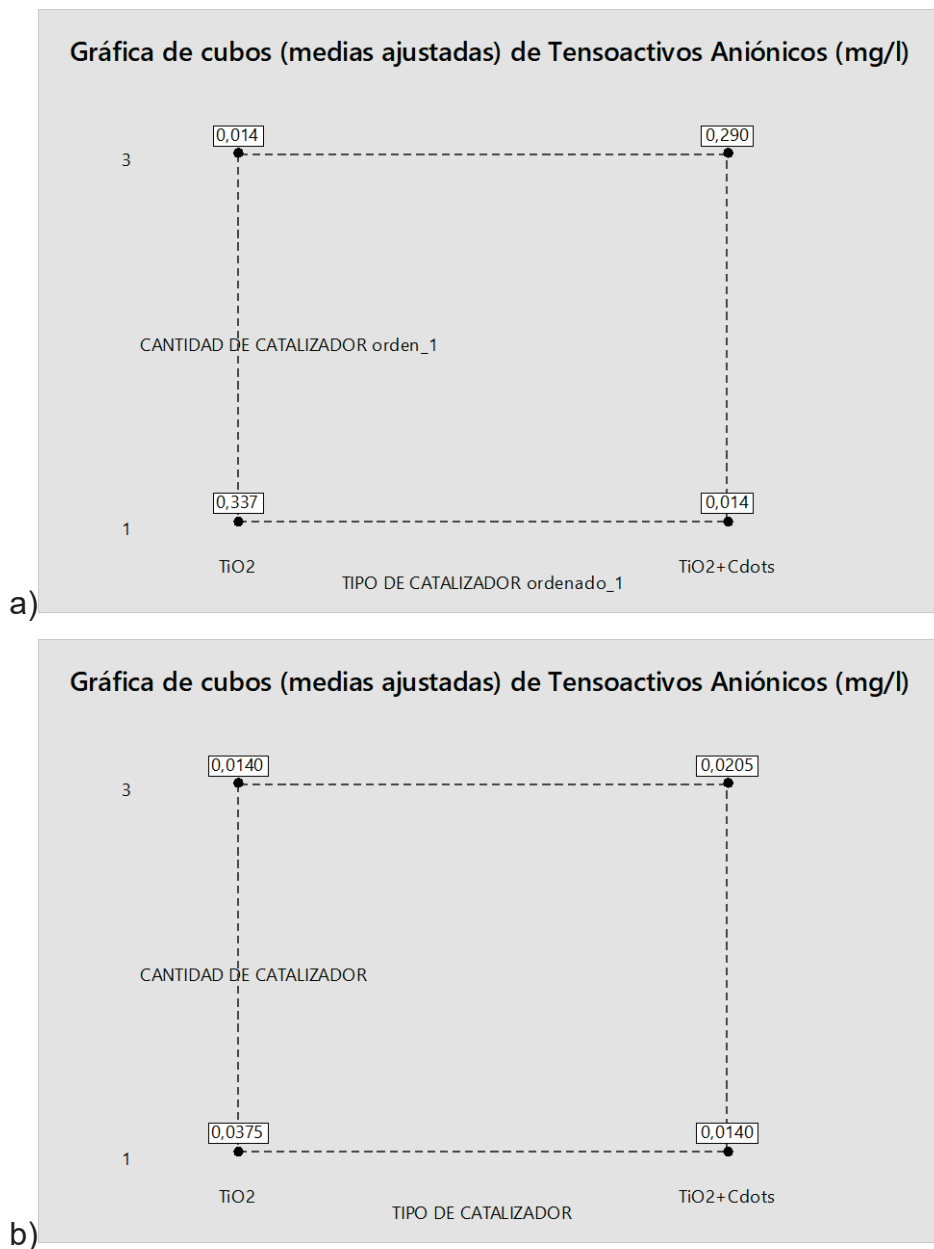


Figura 50. Gráfico de cubos a partir de las medias ajustadas de los valores de tensoactivos aniónicos de los tratamientos. a) Tratamientos sin un agente oxidante; b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

Todos los tratamientos presentaron una reducción de la concentración de tensoactivos aniónicos, pero se puede observar que tiene el mismo efecto el uso

de 3g de TiO₂ comercial y el uso de 1g de TiO₂ dopado con puntos de carbono, que muestra la concentración más baja de tensoactivos.

NO IONICOS

Tabla 41.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de tensoactivos no iónicos en los tratamientos de fotocátalisis heterogénea

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	53.01	17.671	13.90	0.014	84.68%
<i>Error</i>	4	5.09	1.271			
<i>Total</i>	7	58.01				

El valor de R² ajustado es de 0.84 lo que indica que los valores se ajustan al modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que indica que no todas las medias son iguales. Estos valores representan una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la concentración de tensoactivos no iónicos de las muestras.

Tabla 42.

Resultado del análisis de varianza para los valores obtenidos de tensoactivos no iónicos en los tratamientos de fotocátalisis heterogénea añadiendo un agente oxidante

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	R- cuad.(ajustado)
<i>Tratamientos</i>	3	9.330	3.110	6.72	0.048	71.04%

<i>Error</i>	4	1.850	0.462
<i>Total</i>	7	11.180	

El valor de R^2 ajustado es de 0.71 lo que indica que los valores se ajustan al modelo y el valor p es menor que el valor de nivel de significancia por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que indica que no todas las medias son iguales. Estos valores representan una diferencia significativa del efecto de los tratamientos sobre la concentración de tensoactivos no iónicos de las muestras.

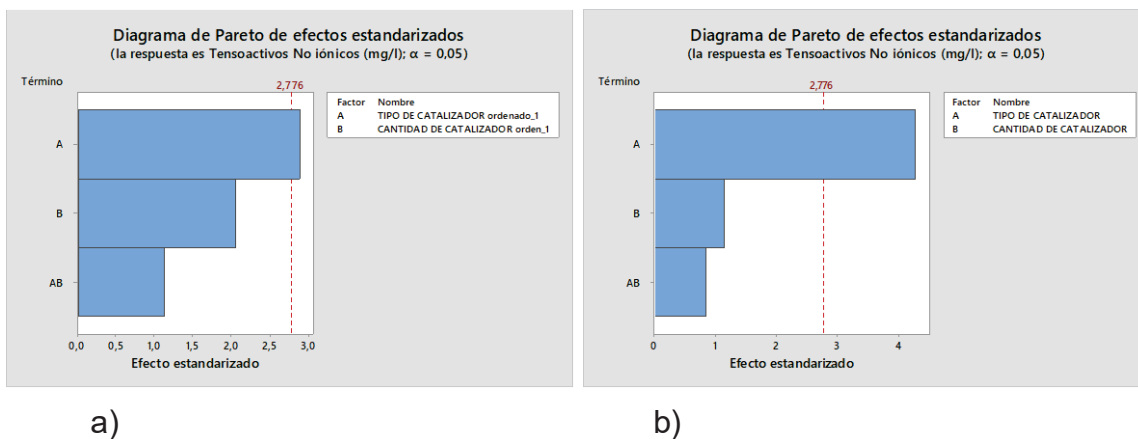


Figura 51. Diagrama de Pareto de los efectos de los factores establecidos sobre la concentración de tensoactivos no iónicos de las muestras.
a) Tratamientos sin un agente oxidante;
b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

El diagrama anterior muestra que el único factor que presenta un efecto significativo sobre la concentración de tensoactivos no iónicos después del tratamiento de fotocátalisis es el tipo de catalizador.

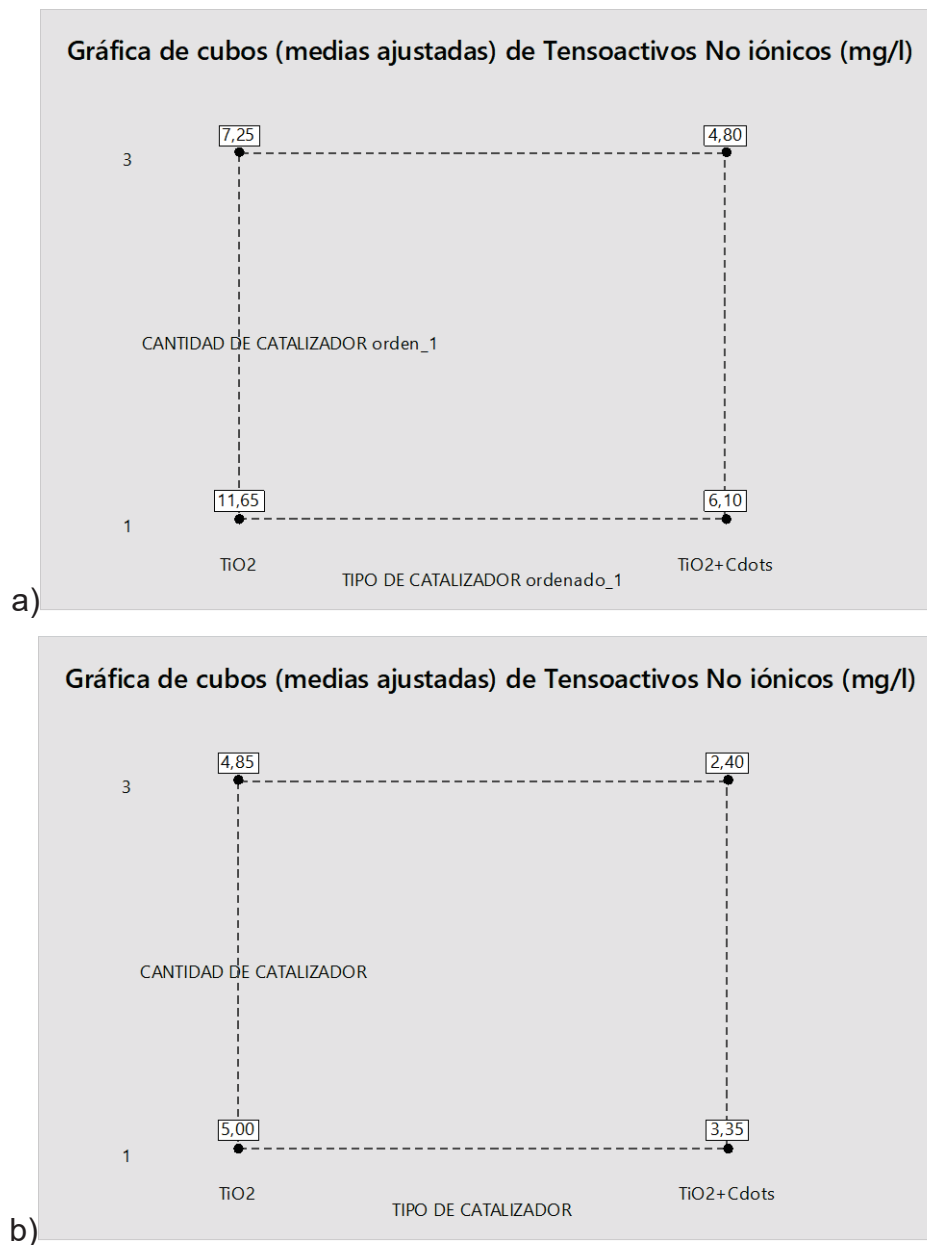


Figura 52. Gráfico de cubos a partir de las medias ajustadas de los valores de tensoactivos de los tratamientos. a) Tratamientos sin un agente oxidante; b) Tratamientos con la presencia de un agente oxidante

Todos los tratamientos presentaron una reducción de la concentración de tensoactivos no iónicos, pero la mayor reducción se presenta por el uso del

catalizador dopado con puntos de carbón, y entre estos tratamientos, el que mostró una menor cantidad de tensoactivos no iónicos después del proceso de fotocatalisis heterogénea fue el tratamiento en el que se aplicó 3g de TiO_2 dopado.

5. Análisis De Resultados

5.1 pH

El aumento de este parámetro es mayor en los tratamientos donde solamente se utiliza TiO_2 . Para los tratamientos de mejora, el pH sufre un ligero aumento, mayor en los tratamientos donde solamente se utiliza TiO_2 . La carga superficial del fotocatalizador está determinada por el pH, de esta manera, el TiO_2 en medio ácido, puede permitir que la superficie se cargue positivamente. Se ha visto que tanto la actividad fotocatalítica como la oxidante son mayores a valores de pH ácidos. Sin embargo, es necesario controlar la presencia de H^+ en el medio ácido, pues esto puede provocar una disminución de la velocidad de reacción (Gaya & Abdullah, 2008).

El agua residual proveniente de la industria textil puede presentar una gran variación en su pH, lo que puede tener efectos en las reacciones fotocatalíticas y alterar no solamente la carga de la superficie del catalizador sino también la capacidad de ionización de los contaminantes, principalmente los orgánicos (Ahmed, et al., 2011, p.11).

Al disminuir el pH, se aumenta la velocidad de reacción debido a que si el valor del pH es menor que el valor del punto isoeléctrico del TiO_2 (pH = 6.5), este se cargará positivamente, permitiendo que se generen condiciones adecuadas para dar paso a una actividad eficiente entre la superficie del fotocatalizador y los

compuestos contaminantes que tienen una carga negativa (Valencia, Marín, & Restrepo, 2011).

Sin embargo, a pesar de que los valores de pH de los tratamientos Y_1 y Y_2 cumplan con la normativa, este aumento puede deberse a una formación de subproductos de la mineralización tales como ácidos carbónico o sulfúrico (Visitación & Gamboa, 2005, p.9). En cambio, un menor aumento de pH después de los tratamientos Y_3 , Y_4 , Y_5 , Y_6 , Y_7 y Y_8 muestran un mejor desarrollo del proceso de mineralización al no generar la formación de subproductos.

5.2 Conductividad

En cualquier material, la conductividad se relaciona con la presencia de portadores de carga. En los materiales semiconductores (TiO_2), estos portadores son electrones que están presentes en la banda de conducción y en los huecos existentes en la banda de valencia. Los electrones de la banda de conducción tienen una carga negativa mientras que los electrones de la banda de valencia tienen carga positiva, razón por la cual, se mueven en sentido opuesto dentro de un campo eléctrico (Candal, Bilmes, & Blesa).

El TiO_2 es un semiconductor que, por sus características, al ponerse en contacto una fuente de luz genera una transferencia de cargas formando un campo eléctrico sobre su superficie. Así, se produce una foto excitación donde los fotones con la energía necesaria son absorbidos y las bandas existentes de valencia y de conducción logran separar cargas y llenar pares de electrón hueco, permitiendo de esta manera la mineralización de sustancias contaminantes. Esto puede sugerir que los huecos de par electrón fueron ocupados por las sustancias contaminantes para poder ser mineralizados y por tal motivo, no existe la cantidad de portadores de carga que existieron inicialmente, observándose una conductividad menor.

5.3 Demanda Química de Oxígeno

Se puede observar claramente el efecto del uso de TiO_2 dopado sobre el TiO_2 comercial, pues en estos tratamientos, el DQO presentó una reducción mayor, tanto en los tratamientos sin la adición de un oxidante como en las condiciones de mejora.

De los tratamientos de mejora, el mayor porcentaje de remoción se presentó con el uso de 3g de TiO_2 dopado y 0.6ml de H_2O_2 . Comparando los mejores resultados de los tratamientos y de los obtenidos de la mejora donde se utiliza H_2O_2 , es posible ver que este último presenta un mayor porcentaje de remoción con un 13.3% superior a un tratamiento con las mismas características, pero sin el uso de un agente oxidante.

La presencia de otras sustancias en la muestra tales como grasas y otros compuestos, pueden alterar no solo la degradación de tensoactivos sino también la degradación de la materia orgánica, pues todos estos compuestos pueden competir por reaccionar con los pares electrón-hueco (Visitación & Gamboa, 2005). El agua que sale del tratamiento de coagulación-floculación tiene una baja concentración de metales, grasas y otros compuestos, lo que evita una interferencia en la degradación fotocatalítica de la materia orgánica, color y tensoactivos.

En trabajos realizados para el estudio de la degradación de materia orgánica en el agua aplicando fotocatalisis heterogénea, se ha utilizado la cromatografía para identificar el avance de este proceso. De esta manera se ha observado que la degradación de la materia orgánica no se da de forma inmediata, sino que primero se degrada en elementos más pequeños. Esta degradación se lleva a cabo en la superficie del catalizador a medida que la materia orgánica ocupa un área mayor de su superficie (Valencia, Marín, & Restrepo, 2011).

5.4 Turbidez

Después de las consideraciones necesarias para los valores óptimos de pH, otro de los parámetros fundamentales a considerar es el valor de turbidez. Altos valores de este parámetro pueden provocar una reducción de la eficiencia de la fotocátalisis heterogénea, pues interfieren con el paso de luz y por ende no existe una correcta foto activación del semiconductor. El agua residual proveniente de los procesos textiles tiene elevados valores de turbidez, generados por residuos de fibras y productos utilizados para la fijación del color, razón por la cual es necesario realizar un tratamiento previo de coagulación-floculación. Para este proceso se utilizó AQUAFLEX CD PLUS cuyo proveedor es QUIMICOLOURS. Con este tratamiento se elimina no solamente gran cantidad de sólidos suspendidos sino también el color.

No se muestra una gran eficiencia en la reducción de este parámetro, esto puede deberse a que el catalizador se lo utiliza en suspensión, razón por la cual los valores de turbidez en ciertos casos aumentan y es necesario que al final del tratamiento sea sedimentado. Por tal motivo se han realizado diversos estudios utilizando catalizadores soportados en diversos materiales (Ahmed, Rasul, Martens, Brown, & Hashib, 2011), no solo para evitar un aumento de turbidez que pueda disminuir la eficiencia de la fotooxidación sino también para la reutilización del catalizador (Sarria, Kenfack, Guillod, & Pulgarin, 2003). En los tratamientos Y₄ y Y₈ los valores aumentan, esto puede deberse a que el producto dopado del TiO₂ adquirió una coloración ligeramente amarilla y se generaron algunas partículas de mayor tamaño.

Los valores más altos de reducción se presentan en los tratamientos donde se utiliza el catalizador sin dopaje de puntos de carbono y en concentraciones de 1g (Y₁ y Y₅).

5.5 Potencial Oxido-Reducción

El potencial de oxidación-reducción permite determinar si una sustancia actúa como un agente oxidante o reductor. Si una sustancia actúa como reductor su potencial para poder transferir electrones es alto. En cambio, si tiene propiedades oxidantes, la capacidad de transferir electrones es baja. Estos agentes oxidantes y reductores siempre se encuentran en parejas: un agente reductor fuerte junto con un oxidante débil (Olmo & Nave, 2018). Un número negativo de este potencial indica la presencia de un agente reductor mientras que si existe un oxidante fuerte tendrá un potencial positivo. En todos los tratamientos, el valor del potencial oxidación-reducción aumentó considerablemente, especialmente en los tratamientos donde se usó un agente oxidante, por este motivo, su presencia se observa por el aumento del valor y por su signo positivo.

5.6 Absorbancia

En el análisis de este parámetros, se puede observar que no solamente afecta la cantidad de catalizador, pues con mayor cantidad del mismo la reducción disminuye, sino también las características del TiO_2 dopado, pues al sintetizar los puntos de carbono, el cambio de coloración de la sustancia después de un calentamiento por microondas, cambia su coloración a un amarillo o café claro, razón por la cual el catalizador ya dopado también adquiere una coloración un tanto amarillenta y fue este color el que se reflejó también la muestra de agua.

5.7 Tensoactivos

ANIONICOS

El tratamiento con menor eficiencia fue Y_1 en donde se utiliza 1g de TiO_2 . En los tratamientos Y_2 , Y_3 , Y_6 y Y_7 se evidenció el mayor porcentaje de remoción de

tensoactivos aniónicos mostrando una eficiencia de 99.15%. Los resultados de los análisis de laboratorio mostraron un valor <0.014 que es el rango mínimo de lectura, por lo que el porcentaje de remoción puede ser aún mayor que el mostrado en las tablas anteriores. Los tratamientos con 1 g de TiO_2 dopado mostraron igual resultado que en los tratamientos donde se utilizó 3 g de TiO_2 sin la presencia de puntos de carbono.

Según la normativa ecuatoriana, el valor máximo permisible es de 2mg/l, por lo tanto, todos los tratamientos presentan valores inferiores a los determinados por la norma.

En los tratamientos donde no se agregó un agente oxidante, se puede visualizar que existe una diferencia entre el efecto logrado con el uso del catalizador comercial y el catalizador dopado con puntos de carbono, pues con el uso de 1g de TiO_2 , la reducción lograda con el catalizador dopado es de 99.15% mientras que sin la presencia de puntos de carbono la reducción es de 79.58%. En cambio, con el uso de 3g de catalizador, el porcentaje de reducción es mayor con el uso de TiO_2 . Los puntos de carbono tienen gran cantidad de compuestos que contienen oxígeno (Wang, Lu, Tang, & Xu, 2017) por este motivo tienen una acción similar al H_2O_2 en el proceso de fotocatalisis al generar radicales OH. Por tal razón, la concentración excesiva de puntos de carbono, al igual que de peróxido, puede generar una reducción de la eficiencia. En el caso de los tratamientos donde se agrega H_2O_2 , la diferencia entre el uso de TiO_2 con y sin dopaje es mínima pues solamente hay una diferencia de 1.42% entre los tratamientos Y_5 y Y_6 , siendo mayor la reducción con la adición de puntos de carbono sobre el catalizador comercial. En el caso de la aplicación de una concentración de 3g, se da un caso similar al de los tratamientos sin peróxido, donde Y_6 tiene mayor remoción que Y_8 con una diferencia de 0.39%.

En el caso de los tensoactivos aniónicos, las características estructurales de estos permiten que se ionicen negativamente. Esto permite que existe una mayor

actividad en la banda de valencia y conducción del catalizador, permitiendo que sean atraídos a los huecos generados, resultando en una mayor degradación de estos (Ríos, 2014).

En estudios realizados de degradación de tensoactivos tanto aniónicos como no iónicos, se obtuvieron mejores resultados con un pH ácido. Además, el uso de peróxido de hidrogeno mejoró la degradación de los tensoactivos, aunque si la cantidad de este es excesiva el efecto de la fotocatalisis decrecerá. Todos estos análisis aún no han sido implementado y analizados a escala industrial (Cantarero, 2010).

NO IONICOS

En todos los tratamientos, se puede observar que el porcentaje de remoción aumenta con el uso de una mayor cantidad del fotocatalizador TiO_2 y este porcentaje es aún mayor si se utiliza TiO_2 dopado con puntos de carbón. La adición de H_2O_2 mejora considerablemente la eficiencia de los tratamientos pues en el caso de Y_4 y Y_8 que fueron los que tuvieron el mayor porcentaje de reducción, Y_8 que es donde se agregó el oxidante reduce la cantidad de tensoactivos un 15% más que con el uso del mismo tipo y concentración de catalizador, pero sin la adición de H_2O_2 .

Al aumentar la concentración del catalizador se puede aumentar también la velocidad de la reacción de degradación de tensoactivos pues con esto el área superficial es mayor, los puntos activos disponibles son más y se presenta una mayor oxidación. Sin embargo, si se sigue aumentando la concentración de TiO_2 , se puede incrementar la turbidez de la muestra de agua reduciendo de esta forma la entrada de luz y los puntos activos para la degradación de los contaminantes. Por tanto, es fundamental que se determinen valores óptimos tanto de pH como de cantidad y tipo de catalizador (Valencia, Marín, & Restrepo, 2011).

Un grupo importante de tensoactivos no iónicos son los etoxilados que poseen diversos radicales en su estructura por lo que pueden generarse reacciones con otros compuestos e interferir no solo con el proceso de fotocátalisis sino también con su determinación (Ríos, 2010). Otra de las características de este grupo es que, si aumenta el peso molecular, estos pueden lograr una cierta consistencia sólida y si se encuentran en un medio donde existen iones de calcio o magnesio, su precipitación será mucho menor (Cantarero, 2010). Al adquirir esta consistencia, puede ser que se reduzca la cantidad de tensoactivo que reacciona en la superficie del catalizador.

La degradación de tensoactivos no iónicos puede ser evaluada también a través de la cantidad de CO₂ y el carbono orgánico disuelto en el agua. Además, se ha podido observar que los radicales OH actúan primero sobre los grupo etoxi y en los anillos de benceno; y la velocidad de reacción depende de la cantidad de tensoactivos que queden absorbidos en la superficie del catalizador (Venhuis & Mehrvar, 2004).

5.8 Catalizador Dopado con Puntos de Carbono

Se puede observar que el uso de puntos de carbono para dopar el TiO₂ mejora las características del mismo, lo que se ve reflejado en los porcentajes de reducción de las variables respuesta. Los puntos de carbono modifican y mejoran las características del catalizador, por ejemplo, puede absorber un mayor porcentaje de luz visible, se puede reducir la foto corrosión, mejora su estabilidad (Candal, Bilmes, & Blesa). También, una deficiencia en la cantidad de luz o en las características del medio puede provocar que los pares electrón-hueco se recombinen y reduzcan la eficiencia del proceso de fotocátalisis. Esto se puede evitar con el dopaje del catalizador (Ahmed, Rasul, Martens, Brown, & Hashib, 2011). Además, los puntos de carbono mejoran la capacidad de donar y recibir

electrones, lo que aumenta la formación de pares electrón-hueco (Wang, Lu, Tang, & Xu, 2017).

El uso de elementos como el ácido cítrico y el método microondas para la obtención de puntos de carbono, no solo es una fácil de obtenerlos, sino que también presenta un tiempo muy corto de generación y se obtienen tamaños mucho más uniformes (Wang, Lu, Tang, & Xu, 2017).

Todas estas ventajas se ven reflejadas en una mayor actividad en la generación de pares electrón-hueco, formación de iones hidroxilo y mineralización completa de contaminantes.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

El proceso de fotocátalisis heterogénea con TiO_2 y $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$ presenta una alta eficiencia para la reducción de tensoactivos en aguas residuales provenientes de la industria textil. Se propuso un análisis del efecto de la adición de un agente oxidante en la reducción de tensoactivos, obteniendo porcentajes de remoción mayores.

Los resultados de la caracterización inicial mostraron un valor de 1.65mg/l de tensoactivos aniónicos que se encuentran dentro de norma que indica que para descargas al alcantarillado debe tener un valor máximo de 2mg/l y para descargas a un cuerpo hídrico de 0.5mg/l. Sin embargo, con la fotocátalisis se pudo reducir esta concentración a 0.014mg/l. Para el caso de los tensoactivos no iónicos, no existe un valor máximo permisible en la normativa ambiental ecuatoriana, sin embargo, se obtuvieron altos porcentajes de remoción llegando a valores entre 4.8 y 2.4 mg/l cuando la caracterización inicial mostró un valor de 16 mg/l.

La combinación tanto del tipo de catalizador como de la concentración de este tiene un efecto significativo en la degradación de tensoactivos aniónicos. Debido a la baja concentración de tensoactivos aniónicos en la muestra inicial, el uso de 3g de TiO_2 y 1g de $\text{TiO}_2+\text{Cdots}$ con y sin la adición de un agente oxidante, tienen el mismo porcentaje de reducción, por lo que se podría utilizar 3g de catalizador comercial sin agregar un oxidante pues representaría un menor costo, se presentaría una reducción de 83.23% de absorbancia, 30% menos de turbidez y 57.67% menos DQO.

Para el caso de los tensoactivos no iónicos, el mayor porcentaje de remoción se obtiene con el uso de 3g de TiO_2 dopado con puntos de carbono y con la adición de H_2O_2 , alcanzando un 85% de reducción de tensoactivos, 48% de reducción de absorbancia, un aumento de 20% de turbidez y 85% menos DQO. Si la turbidez

inicial es muy alta, la mejor opción sería el uso de 1g de TiO_2 dopado con puntos de carbono y la adición de H_2O_2 logrando un 79% de reducción de tensoactivos, 65% de reducción de absorbancia, 17% menos de turbidez y 74% menos DQO. Si el agua posterior al tratamiento de fotocátalisis va a ser reutilizada en los procesos textiles, puede ser que la adición del peróxido interfiera con la calidad del producto de los procesos industriales, por lo que es mejor utilizar 3g de TiO_2 dopado pues se tiene un 70% de remoción de tensoactivos no iónicos.

La síntesis de puntos de carbono por microondas y el uso de precursores como el ácido cítrico, no solo proporcionan una manera fácil de obtener puntos de carbono sino también una opción amigable con el medio ambiente y de bajo costo. El dopaje de TiO_2 con puntos de carbono puede potenciar las características fotocatalíticas del mismo generando una mayor actividad en su superficie, lo que permite una mineralización más eficaz de los contaminantes presentes en las aguas residuales textiles y por ende una menor contaminación de los cuerpos hídricos.

El peróxido aporta una mayor concentración de radicales OH^\cdot ayudando en el proceso degradativo de las moléculas de tensoactivos, así como la mineralización de colorantes, materia orgánica y otro tipo de contaminantes.

El proceso de fotocátalisis heterogénea y el resultado que se obtenga en la degradación de contaminantes depende no solamente del tipo y cantidad del catalizador, sino también del pH, intensidad de luz, concentración inicial de contaminantes, iones presentes en el agua, temperatura.

6.2 Recomendaciones

El pH es un factor fundamental en el proceso de fotocátalisis y la necesidad de reducirlo aumenta los costos de operación y modifica el pH final del agua lo que puede afectar la calidad del agua tanto para la descarga a un cuerpo hídrico como para su reutilización en los procesos industriales. Por tal motivo se deberían

estudiar alternativas a las condiciones de fotocátalisis para operar con un pH cercano a la neutralidad.

La temperatura afecta la velocidad de reacción y la vuelve muy lenta. Esto sucedió al sacar las muestras de agua del refrigerador a 4°C y someterlas a fotocátalisis a esa temperatura. La reducción de tensoactivos y los demás parámetros respuesta fue nula. Por este motivo se recomienda dejar las muestras fuera de refrigeración hasta que adquieran temperatura ambiente para poder obtener un proceso de oxidación eficiente.

El precursor utilizado en este trabajo fue el ácido cítrico el mismo que se puede obtener de residuos orgánicos tales como la cáscara de naranja. En este sentido existe un campo muy amplio para la investigación de elementos orgánicos que permitan la obtención de puntos de carbono.

Se recomienda realizar un estudio más amplio de la estructura de los puntos de carbono obtenidos y del catalizador dopado con ellos para poder desarrollar mejores características en los catalizadores dopados y mejores resultados en los procesos de fotocátalisis para la degradación de contaminantes emergentes.

También se recomienda el estudio de la efectividad de la fotocátalisis para la remoción de tensoactivos y otros contaminantes utilizando el catalizador soportado en diversos materiales, pues esto podría mejorar el proceso, eliminar la necesidad de una sedimentación posterior y permitir la reutilización del catalizador.

Así como también se recomienda estudiar la eficiencia que tiene el uso de catalizadores dopados con puntos de carbono frente a la luz solar para reducir costos y poder implementar el tratamiento a escala industrial.

REFERENCIAS

- Ahmed, S., Rasul, M., Martens, W., Brown, R., & Hashib, M. (2011). Advances in Heterogeneous Photocatalytic Degradation of Phenols and Dyes in Wastewater: A Review. *Water Air Soil Pollut*, 215, 3-29. doi:10.1007/s11270-010-0456-3
- AITE. (2018). *Industria Textil*. Recuperado el 8 de septiembre de 2018 de <http://www.aite.com.ec/industria.html>
- Alisanfi, A., Evenou, F., Abdulkarim, E., Pons, M., Zahraa, O., Benhammou, A., . . . Nejmeddine, A. (2007). Treatment of textil industry wastewater by supported photocatalysis. 439-445. doi:10.1016/j.dyepig.2006.02.024
- Arslan, I., & Balcioglu, I. (2001). Advanced oxidation of raw and biotreated textile industry wastewater with O₃, H₂O₂ /UV-C and their sequential application. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* , 76(1), 53-60. doi:10.1002/1097-4660(200101)76:1<53::AID-JCTB346>3.0.CO;2-T
- Bernabeu, A. (s.f.). Solar photocatalysis as a tertiary treatment to remove emerging pollutants from wastewater treatment plant effluents.
- Brillas, E., Sirés, I., & Oturan, M. (2009). Electro-Fenton Process and Related Electrochemical Technologies. *Chemical Review*, 109(12), 6570–6631. doi:10.1021/cr900136g
- Candal, R., Bilmes, S., & Blesa, M. (s.f.). *SEMICONDUCTORES CON ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA* . Recuperado el 27 de octubre de 2018 de <https://www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/10cap04.pdf>
- Cantarero, A. (2010). *Determinación de tensoactivos aniónicos en matrices ambientales. Comportamiento del jabón en una parcela agrícola. (Tesis Doctoral)*. Recuperado el 28 de octubre de 2018 de <http://0-hera.ugr.es.adrastea.ugr.es/tesisugr/18615521.pdf>
- Carvajal, J. (2011). Fotocatálisis heterogénea para el abatimiento de tensoactivos aniónicos en aguas residuales. *Producción+Limpia*, 6(2), 92-107.

- Recuperado el 3 de noviembre de 2018 de <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/133>
- Castañeda, A. (2014). *PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA APLICADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO*. Recuperado el 3 de septiembre de 2018 de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/84/1/Casta%C3%B1eda%20Jimenez%2C%20Amparo%20Carolina%20-%202014.pdf>
- Chiva, S., Berlanga, J., Martínez, R., & Climent, J. (2017). *PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA EN EL CICLO INTEGRAL DEL AGUA*. (P. d. I., Ed.) doi:<http://dx.doi.org/10.6035/UJI.FACSA.2017.1>
- Comninellis, C. (2008). Perspective Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 769-776.
- Correia, V., Stephenson, T., & Judd, S. (1994). Characterisation of textile wastewaters - a review. *Environmental Technology*, 15(10), 917-929. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/09593339409385500>
- Cubillos, D. (2006). *EVALUACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN FOTOCATALÍTICO DE TENSOACTIVOS ANIÓNICOS*. Recuperado el 7 de diciembre de 2018 de <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14837/T41.06%20C891e.pdf;jsessionid=D2E9C4893970B105468CB0FB40CBD586?sequence=1>
- Delgado, D., & Santander, N. (2017). *REMOCIÓN DE COLORACIÓN DE TINTES DE TEÑIDO EN AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL, UTILIZANDO PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)*. Recuperado el 12 de octubre de 2018 de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4227>
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63, 515–582. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001>

- GADMUR. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial Cantón Rumiñahui 2012-2025*. Recuperado el 2 de diciembre de 2018 de <http://181.112.151.212/Documentacion/Cant%C3%B3n%20Rumi%C3%B1ahui/pdyot-2014-2019.pdf>
- Gaya, U., & Abdullah. (2008). Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 9(1), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2007.12.003>
- Gil, M., Soto, A., Usma, J., & Gutiérrez, O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 52-73.
- Henderson, M. (2011). A surface science perspective on TiO₂ photocatalysis. *Surface Science Reports*, 65, 185-297. doi:10.1016/j.surfrep.2011.01.001
- Ikehata, K., & Gamal, M. (2004). Degradation of Recalcitrant Surfactants in Wastewater by Ozonation and Advanced Oxidation Processes: A Review. *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*, 26(4), 327-343. doi: 10.1080/01919510490482160
- Ivankovic, T., & Hrenovic, J. (2009). SURFACTANTS IN THE ENVIRONMENT. *Arh Hig Rada Toksikol*, 95-110. doi:10.2478/10004-1254-61-2010-1943
- Ivester, A., & Neefus, J. (s.f.). *LA INDUSTRIA TEXTIL: HISTORIA Y SALUD Y SEGURIDAD*. Recuperado el 18 de septiembre de 2018 de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/89.pdf>
- Jaramillo, C., & Taborda, G. (2006). LA FOTOCATÁLISIS: ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA UNA BUENA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES. *Revista Universidad de Caldas*, 71-88.
- Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural Science*, 4(1), 22-26. doi:<http://dx.doi.org/10.4236/ns.2012.41004>
- Krishnan, S., Chandran, K., & Sinnathambi, M. (2016). Wastewater Treatment Technologies Used for the Removal of Different Surfactants. *International*

- Journal of Applied Chemistry*, 12(4), 727-739 . Recuperado el 12 de noviembre de 2018 de <http://www.ripublication.com>
- Líderes, R. (2017). *Sector textil es el segundo de Ecuador que genera más empleo*. Recuperado el 22 de septiembre de 2018 de <https://www.revistalideres.ec/lideres/sector-textil-ecuador-genera.html>
- Moore, S., & Ausley, L. (2004). Systems thinking and green chemistry in the textile industry: concepts, technologies and benefits. *Journal of Cleaner Production* , 12, 585–601. doi:10.1016/S0959-6526(03)00058-1
- Olmo, M., & Nave, R. (2018). *Potenciales de Oxidación-Reducción*. Recuperado el 19 de septiembre de 2018 de Department of Physics and Astronomy. Georgia State University: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Chemical/redoxp.html>
- Ordoñez, M. (2015). Los dos lados de la tela. *REVISTA GESTION*, 52-59.
- Oturan, M., & Aaron, J. (2014). Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577-2641. doi:10.1080/10643389.2013.829765
- Poyatos, J., Muñio, M., Almecija, M., Torres, J., Hontoria, E., & Osorio, F. (2010). Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: State of the Art. *Water Air Soil Pollut*, 205, 187–204 . doi:10.1007/s11270-009-0065-1
- PSA. (2018). *Plataforma Solar de Almería*. Recuperado el 28 de septiembre de <https://www.psa.es/es/areas/tsa/general.php>
- Ríos, F. (2010). *COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DE TENSIOACTIVOS COMERCIALES ANIÓNICOS Y NO IÓNICOS*. Recuperado el 11 de diciembre de 2018 de https://www.researchgate.net/publication/50369190_Comportamiento_ambiental_de_tensioactivos_comerciales_anionicos_y_no_ionicos
- Ríos, F. (2014). *COMPORTAMIENTO AMBIENTAL DE TENSOACTIVOS COMERCIALES: BIODEGRADABILIDAD, TOXICIDAD Y OZONIZACIÓN. (Tesis Doctoral) Universidad De Granada* . Recuperado el 11 de diciembre

- de 2018 de
<http://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/42048/24452968.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salas, G. (2010). TRATAMIENTO POR OXIDACIÓN AVANZADA (REACCIÓN FENTON) DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL . *Rev. Per. Quím. Ing. Quím*, 13(1), 30-38.
- Sarria, V., Kenfack, S., Guillod, O., & Pulgarin, C. (2003). An innovative coupled solar-biological system at field pilot scale for the treatment of biorecalcitrant pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 159, 89-99. doi:10.1016/S1010-6030(03)00105-9
- Schlumberger. (2018). *Oilfield Glossary*. Recuperado el 25 de noviembre de 2018 de
https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/s/sequestering_agent.aspx
- Scott, M. (2000). The biodegradation of surfactants in the environment. *Biochimica et Biophysica Acta* , 235-251.
- Solé, A. (2014). TENSIOACTIVOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL. *3C Tecnología*, 3(3), 137 - 151.
- Solis, M., Gil, J., Solis, A., Pérez, H., Manjarrez, N., & Perdomo, M. (2013). EL PROCESO DE SEDIMENTACION COMO UNA APLICACION SENCILLA PARA REDUCIR CONTAMINANTES EN EFLUENTES TEXTILES. *12(3)*, 585-594. Recuperado el 28 de septiembre de 2018 de
<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n3/v12n3a20.pdf>
- Stasinakis, A. (2008). USE OF SELECTED ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOPs) FOR WASTEWATER TREATMENT – A MINI REVIEW. *Global NEST Journal*, 10(3), 376-385. Recuperado de 5 de septiembre de 2018 de
http://journal.gnest.org/sites/default/files/Journal%20Papers/376-385_598_Stasinakis_10-3.pdf

- Valencia, S., Marín, J., & Restrepo, G. (2011). Efecto del pH en la Degradación Fotocatalítica de Materia Orgánica Natural. *Información Tecnológica* , 22(5), 57-66. doi:10.4067/S0718-07642011000500008
- Venhuis, S., & Mehrvar, M. (2004). Health effects, environmental impacts, and photochemical degradation of selected surfactants in water. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PHOTOENERGY* , 6, 115-125. Recuperado el 8 de diciembre de 2018 de <http://www.hindawi.com>
- Visitación, L., & Gamboa, N. (2005). *Degradación fotocatalítica de detergentes en efluentes domésticos*. Recuperado el 12 de diciembre de 2018 de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/91>
- Wang, J., & Xu, L. (2012). Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42:3, 251-325. doi: 10.1080/10643389.2010.507698
- Wang, R., Lu, K., Tang, Z., & Xu, Y. (2017). Recent progress in carbon quantum dots: synthesis, properties and applications in photocatalysis. *Journal of Material Chemistry A*, 3717-3734. doi:10.1039/c6ta08660h
- Xu, M. (2014). *A green heterogeneous synthesis of N-doped carbon dots and their photoluminescence applications in solid and aqueous states* . Recuperado el 5 de enero de 2018 de <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/nr/c4nr02792b#!divAbstract>
- Ying, G. (2005). Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment. *Environment International*, 32(3), 417-431. doi:10.1016/j.envint.2005.07.004
- Yuan, C., Xu, Z., Fan, M., Liu, H., Xie, Y., & Zhu, T. (2014). Study on characteristics and harm of surfactants . *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(7), 2233-2237 . Recuperado el 7 de enero de 2019 de www.jocpr.com

ANEXOS

ANEXO1

RESULTADOS DE LABORATORIO DE TENSOACTIVOS ANIÓNICOS


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS
LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. AMB 47918
ORDEN DE TRABAJO No. 59636

SOLICITADO POR:	CHAVEZ ERIKA		
DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	SANGOLQUI		
MUESTRA DE:	AGUA RESIDUAL		
DESCRIPCIÓN:	M2.1		
FECHA DE RECEPCIÓN:	11/10/2018	HORA DE RECEPCIÓN:	15H34
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 12/10/2018 AL 12/10/2018		
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	15/10/2018		
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA			
CARACTERÍSTICA:	POCO TURBIA	ESTADO:	LÍQUIDO
		CONTENIDO:	1 l
OBSERVACIONES:	* Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al personal técnico del OSP. * La fecha de recepción corresponde a la fecha en la que se emite la orden de trabajo.		

RESULTADOS				
PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODOS	INCERTIDUMBRE %
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (DETERGENTES ANIÓNICOS)	mg/l	<0,014	MAM-74 / APHA 5540 C MODIFICADO	-


Servicio de Acreditación Ecuador
Acreditación N° OAE LE 10 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS
 Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. AMB 47917
ORDEN DE TRABAJO No. 59836

SOLICITADO POR:	CHAVEZ ERIKA		
DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	SANGOSQUI		
MUESTRA DE:	AGUA RESIDUAL		
DESCRIPCIÓN:	M3.2.1		
FECHA DE RECEPCIÓN:	11/10/2018	HORA DE RECEPCIÓN:	15H34
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 12/10/2018 AL 12/10/2018		
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	15/10/2018		
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA			
CARACTERÍSTICA:	POCO TURBIA	ESTADO:	LÍQUIDO
		CONTENIDO:	1 L
OBSERVACIONES:	* Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al personal técnico del DSP. * La fecha de recepción corresponde a la fecha en la que se emite la orden de trabajo.		

RESULTADOS

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODOS	INCERTIDUMBRE %
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (DETERGENTES ANIÓNICOS)	mg/l	<0,014	MAM-74 / APHA 5540 C MODIFICADO	



Servicio de Acreditaciones Ecuatoriano

Acreditación N° OAE LE TC 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

(Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE)



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. AMB 47713
ORDEN DE TRABAJO No. 59602

SOLICITADO POR:	CHAVEZ ERIKA		
DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	SANGOLQUI		
MUESTRA DE:	AGUA		
DESCRIPCIÓN:	AGUA RESIDUAL		
FECHA DE RECEPCIÓN:	12/09/2018	HORA DE RECEPCIÓN:	14H54
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 12/09/2018 AL 14/09/2018		
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	17/09/2018		
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA			
CARACTERÍSTICA:	TURBIA	ESTADO:	LÍQUIDO
		CONTENIDO:	3l
OBSERVACIONES:	* Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al personal técnico del DSP. * La fecha de recepción corresponde a la fecha en la que se emite la factura.		

RESULTADOS

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODOS	INCERTIDUMBRES
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (DETERGENTES ANIONICOS)	mg/l	0,288	MAM-74 / APHA 5540 C MODIFICADO	11,80



Servicio de Acreditación Ecuador

Acreditación N° OAE LE IC 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. AMB 47991
ORDEN DE TRABAJO No. 59886

SOLICITADO POR:	CHAVEZ ERIKA		
DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	SANGOLQUI		
MUESTRA DE:	AGUA RESIDUAL		
DESCRIPCIÓN:	M3.2.2		
FECHA DE RECEPCIÓN:	17/10/2018	HORA DE RECEPCIÓN:	15H27
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 17/10/2018 AL 23/10/2018		
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	23/10/2018		
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA			
CARACTERÍSTICA:	TURBIA	ESTADO:	LÍQUIDO
OBSERVACIONES:	* Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al personal técnico del OSP. * La fecha de recepción corresponde a la fecha en la que se emite la orden de trabajo.		

RESULTADOS

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODOS	INCERTIDUMBRE %
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (DETERGENTES ANIÓNICOS)	mg/L	0,022	MAM 24 / APHA 5540 C MODIFICADO	11,80



Servicio de Acreditación Cuatrecasas

Acreditación N° OAE LE 10 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

(Los análisis marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE)



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. AMB 47990
ORDEN DE TRABAJO No. 59886

SOLICITADO POR:	CHAVEZ ERIKA		
DIRECCION DEL CLIENTE:	SANGOLQUI		
MUESTRA DE:	AGUA RESIDUAL		
DESCRIPCIÓN:	M1.1		
FECHA DE RECEPCIÓN:	17/10/2018	HORA DE RECEPCIÓN:	15H27
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 17/10/2018 AL 23/10/2018		
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	23/10/2018		
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA			
CARACTERÍSTICA:	TURBIA	ESTADO:	LIQUIDO
		CONTENIDO:	1 LITRO
OBSERVACIONES:	* Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregada al personal técnico del OSP. * La fecha de recepción corresponde a la fecha en la que se emite la orden de trabajo.		

RESULTADOS

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODOS	INCERTIDUMBRE %
SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (DETERGENTES ANIONICOS)	mg/L	0,399	MAM-74 / APHA 5540 C MODIFICADO	11,80



Servicio de
Acreditación
Ecuadoriana

Acreditación N° OAE LE TC 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE

ANEXO 2

MUESTRAS DE AGUA ANTES Y DESPUES DEL TRATAMIENTO DE FOTOCATÁLISIS



ANEXO 3

DOPAJE DE TiO_2 Y COLORACION DE UNA MUESTRA DE AGUA DONDE SE APLICÓ FOTOCATALISIS HETEROGENEA CON CATALIZADOR DOPADO



ANEXO 4

ESTRUCTURA UTILIZADA PARA DOTAR DE LUZ UV A LOS TRATAMIENTOS
EN EL EQUIPO TEST DE JARRAS



