

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Fotocatálisis heterogénea mediante Nanopartículas de TiO_2
para el tratamiento de aguas residuales de camal**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Gabriela Azalia Garcia Castillo

Cristhian Adan Ayala Vasquez

Asesor:

Ing. Orlando Alan Poma Porres

Lima, marzo del 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Orlando Alan Poma Porras, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA MEDIANTE NANOPARTÍCULAS DE TIO₂ PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAMAL”** del (los) autor (autores) Gabriela Azalia Garcia Castillo y Cristhian Adan Ayala Vasquez tiene un índice de similitud de 17% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima a los 26 días del mes de marzo del año 2024



Ing. Orlando Alan Poma Porras

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Lima, Ñaña, Villa Unión, a 26 día(s) del mes de marzo del año 2024 siendo las 2:30 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Mg. Milda Amparo Cruz Huanca, el (la) secretario(a): Mg. Jackson Edgardo Pérez Cario y los demás miembros: Mg. Joel Hugo Fernández Rojas, Mg. Jhiana del Carmen Gutiérrez Rodríguez el (la) asesor(a) Ing. Orlando Alan Poma Poma

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

"Fotocatálisis heterogénea mediante Nanopartículas de TiO2 para el tratamiento de aguas residuales de Camal"

del(los) bachiller(es): a) Gabriela Azalia Garcia Castillo

b) Cristhian Adan Ayala Vasquez

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Ambiental

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Gabriela Azalia Garcia Castillo

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy bueno	Sobresaliente

Bachiller (b): Cristhian Adan Ayala Vasquez

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy bueno	Sobresaliente

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a _____
 Asesor/a _____
 Miembro _____
 Miembro _____
 Bachiller (a) _____
 Bachiller (b) _____
 Bachiller (c) _____

* Esta sustentación fue realizada de manera virtual u online sincrónica conforme al Reglamento General de Grados y Títulos.

AGRADECIMIENTO

Primero agradecer a la Universidad Peruana Unión por habernos formado con buenos valores, por enseñarnos más de investigación para poder estudiar la carrera, así como también a los diferentes docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante día a día.

Agradecemos a mi asesor el Ing. Orlando Alan Poma Porras por habernos brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, por la paciencia y guiarnos durante todo el desarrollo de la tesis.

Agradecemos a nuestros padres por el apoyo incondicional que nos brindaron durante toda esta etapa de realización de la tesis.

ÍNDICE

1. Resumen.....	1
2. Introducción.....	2
3. Materiales y Métodos.....	3
3.1. Lugar de ejecución.....	4
3.2. Muestreo y caracterización del agua residual.....	4
3.3. Sistema fotocatalítico	4
3.4. Diseño experimental.....	4
3.5. Diseño factorial 2^k con replica en el punto central.....	4
3.6. Cinética de degradación.....	4
4. Resultados.....	5
5. Discusión.....	6
6. Conclusión.....	7
7. Referencias bibliográficas.....	8
8. Figuras y tablas.....	9
9. Anexos.....	10

**Fotocatálisis heterogénea mediante Nanopartículas de TiO_2
para el tratamiento de aguas residuales de camal**

**Heterogeneous photocatalysis using TiO_2 nanoparticles for
slaughterhouse wastewater treatment**

Resumen

Este estudio determina la eficiencia de un proceso fotocatalítico heterogéneo utilizando nanopartículas de dióxido de titanio en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal, evaluando la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO). Para su desarrollo experimental se aplicó un control de variables tales como el potencial de hidrógeno, del peróxido de hidrogeno y del dióxido de titanio. Asimismo, se realizó una comparación entre un diseño factorial de 2^3 con réplica de punto central y un diseño compuesto central, para establecer la relación entre las variables de estudio y la variable de respuesta. Y también se estimó la cinética de degradación con el modelo de Langmuir-Hinshelwood, el cual describe de manera acertada la degradación de compuestos orgánicos en procesos de fotocatálisis heterogénea.

Se observó que mientras aumenta la concentración de nano partículas de TiO_2 se maximiza el porcentaje de remoción, alcanzando niveles por encima a 70%, para pH cercanos a 5.5 (peróxido de hidrogeno 40% 5 ml/L y tiempo de recirculación de 2 horas). Asimismo, entre el rango de 4ml/L y 7 ml/L de concentración de peróxido de hidrogeno aumenta el porcentaje de remoción de DQO para un pH de 4.5, con una remoción superior al 80% (Nano partículas de TiO_2 0.6 y tiempo de recirculación de 2 horas). El valor óptimo de remoción de DQO (90.17%) se logró con un ph de 4.3 mg/100ml, nano partículas de TiO_2 a 0.768 ml/100ml y peróxido de hidrogeno a 7.5 ml/L. Por otro lado, la cinética de primer orden de Langmuir-Hinshelwood que explicó la degradación fotocatalítica de la DQO estableció que una mayor tasa de degradación se alcanza hasta los

120 min iniciales, posterior a ello disminuyó considerablemente, todo esto bajo una exposición constante.

Debido a su capacidad para eliminar eficazmente una variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, como la DQO de las aguas residuales, se descubrió que la fotocátalisis heterogénea de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) es un método avanzado y aplicable para el tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: fotocátalisis heterogénea, demanda química de oxígeno (DQO), dióxido de titanio (TiO_2), cinética, Langmuir-Hinshelwood.

Abstract

This study determines the efficiency of a heterogeneous photocatalytic process using titanium dioxide nanoparticles in the treatment of municipal wastewater, evaluating the removal of chemical oxygen demand (COD). For its experimental development, control of variables such as the potential of hydrogen, hydrogen peroxide and titanium dioxide was applied. Likewise, a comparison was made between a 2³ factorial design with central point replication and a central composite design, to establish the relationship between the study variables and the response variable. And the degradation kinetics were also estimated with the Langmuir-Hinshelwood model, which accurately describes the degradation of organic compounds in heterogeneous photocatalysis processes.

It was observed that as the concentration of TiO₂ nanoparticles increases, the removal percentage is maximized, reaching levels above 70%, for pH close to 5.5 (40% hydrogen peroxide 5 ml/L and recirculation time of 2 hours). . Likewise, between the range of 4 ml/L and 7 ml/L of hydrogen peroxide concentration, the percentage of COD removal increases for a pH of 4.5, with a removal greater than 80% (TiO₂ nano particles 0.6 and recirculation time 2 hours). The optimal COD removal value (90.17%) was achieved with a pH of 4.3 mg/100ml, TiO₂ nano particles at 0.768 ml/100ml and hydrogen peroxide at 7.5 ml/L. On the other hand, the first-order Langmuir-Hinshelwood kinetics that explained the photocatalytic degradation of COD established that a higher degradation rate is reached up to the initial 120 min, after which it decreased considerably, all under constant exposure.

Due to its ability to effectively remove a variety of organic and inorganic contaminants such as COD from wastewater, heterogeneous photocatalysis of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles was found to be an advanced and applicable method for wastewater treatment.

Keywords: heterogeneous photocatalysis, chemical oxygen demand (COD), titanium dioxide (TiO₂), kinetics, Langmuir-Hinshelwood.

Introducción

En las últimas décadas, un número cada vez mayor de investigadores en todo el mundo se ha centrado en los métodos para eliminar contaminantes de las aguas residuales. Según Centi y Perathoner (2003) y Wang et al. (2007).

El problema de la contaminación del agua se debe al uso extensivo de diversas sustancias en el desarrollo industrial y en las actividades domésticas, donde en muchos casos estas sustancias se vertieron al medio ambiente sin ningún control o supervisión. Por lo tanto, las personas suelen ignorar el daño potencial que pueden causar a la salud humana, a otros organismos y a varios ecosistemas. (Alrousan et al., 2009; Gomes et al., 2009).

En este sentido, las aguas residuales son aguas cuyas propiedades físicas y químicas han sido alteradas por actividades domésticas o industriales. (Torres & Gutiérrez, 2017; Terán, 2012; Hernández, 2017). Por lo general, estas aguas se descargan sin tratamiento en la red de alcantarillado y luego fluyen hacia una fuente de agua.

En el Perú, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), en 2016 se vertieron 308 207 653 metros cúbicos de aguas residuales domésticas al medio ambiente sin tratamiento (INEI, 2018) y se vierten 2.217.946 metros cúbicos de aguas residuales a la red de alcantarillado. Esto ha causado un deterioro en la infraestructura, instalaciones, maquinaria y equipos de los servicios de alcantarillado, ya que solo el 32% se trata (OEFA, 2014).

De acuerdo con Paitan y Sifuentes (2018), consideran que en la industria cárnica es un contribuyente representativo al vertido de aguas residuales a

cuerpos de agua sin tratamiento previo. Por otro lado, los alimentos a los que se dirige el proyecto deben ser limpios, lo que requiere grandes cantidades de agua y por lo tanto producen altos niveles de contaminantes orgánicos según sea necesario (Oré, 2017; Canales, 2005), y estas actividades son continuas. Mataderos, mataderos o Los centros de bienestar animal son lugares donde se realiza el sacrificio para el proceso industrial de la carne y se procesan como productos finales (Organización Industrial, 2008; Gronerth, 2017).

Las aguas residuales producidas por el canal tienen altas concentraciones de contaminantes y una alta demanda química de oxígeno. Esta demanda química se define como la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación completa por métodos químicos (Agua en Centroamérica, 2008; Cisterna & Peña, 2002); también se considera un indicador del nivel de contaminantes en las aguas residuales y su potencial impacto en el medio ambiente (Chou et al., 2009).

Es esencial encontrar tratamientos eficientes que puedan utilizar energía de manera limpia y eficiente, así como crear sistemas fáciles de mantener y usar (Garcés & Rodríguez, 2004). Estos tratamientos alternativos incluyen procesos de oxidación avanzada (POA), que en algunos casos utilizan energía ultravioleta y fotoactivadores. Un ejemplo de esto es el uso de dióxido de titanio (TiO_2) en la fotocatalisis heterogénea (FH), que produce radicales hidroxilos altamente oxidantes que permiten la degradación de la materia orgánica (Malato et al., 2009), y la mineralización de una amplia gama de compuestos orgánicos (Garcés et al., 2004).

Como expresa Peiro (2003), la excitación de un fotocatalizador sólido (normalmente un semiconductor de banda ancha sumergido en una solución) es la base de la (FH). La solución absorbe la luz visible o ultravioleta, lo que provoca reacciones de energía de oxidación y reducción simultáneas en varios lugares de la interfaz.

Según Gil (2002), el catalizador (sólido) no sufre cambios químicos; la reacción de oxidación o reducción ocurre en la superficie del sólido excitado o en el área de interfaz entre el sólido excitado y la solución. Según Alim et al. (2007), estas reacciones producen un agujero con carga en la banda de valencia al transferir un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Los radicales libres (OH) se forman después de que los electrones transferidos se mezclan con los iones de hidróxido y agua.

El uso de dióxido de titanio en estado nanoestructurado ha dado buenos resultados en los últimos años (Deza, Osorio y Manrique, 2017). Santiago (2018), entre otras cosas, determina la eficiencia de las nanopartículas de TiO₂ en la degradación de compuestos fenólicos en aguas residuales domésticas; se evaluó el TiO₂ en un reactor discontinuo modificado equipado con un dispositivo de agitación y una lámpara de luz UV-visible. La eficiencia de eliminación de DQO es del 37,68% cuando la concentración de TiO₂ es de 150 mg/L y el tiempo de irradiación con luz UV-visible es de 3 horas.

Sin embargo, la eficiencia de la fotocatálisis heterogénea se verá afectada por factores como el valor del pH y la dosis del catalizador (Machuca & Colina, 2011), el catalizador, la temperatura, la intensidad de la radiación, el diseño del reactor, los aditivos y la concentración de contaminantes durante el proceso.

(Blessa, 2001) afirma La metodología de superficie de respuesta (RSM) es una herramienta estadística que se puede utilizar para optimizar estas condiciones operativas (Zhang et al. 2010; Marrugo 201).

El propósito de este estudio fue determinar la eficiencia de un proceso fotocatalítico heterogéneo utilizando nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) para el tratamiento de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipal de Barranca. Este estudio se llevó a cabo teniendo en cuenta todos los factores mencionados anteriormente.

Materiales y métodos

Lugar de ejecución

La investigación se llevó a cabo en dos instalaciones, el primero en el laboratorio de AGQ LABS del Callao, ubicado en el distrito del Callao – Lima Av. Santa Rosa 511 la Perla – Callao, con coordenadas geográficas 12°04'11.1"S 77°07'17.2"W, donde se llevó a cabo el análisis de los parámetros de las aguas residuales de la planta de camal y ejecución de los experimentos a escala piloto. El segundo se encuentra en las instalaciones del camal de Barranca, ubicadas en el km 175 panamericana norte de Lima, Perú. Sus coordenadas geográficas son 10°45'14"S 77°45'40"O. Donde se tomó una muestra de agua residual para caracterizarla.

Muestreo y caracterización del agua residual

Se utilizó una muestra de 20 litros de agua residual de la trampa de grasas de la planta de ganado vacuno para su procesamiento como muestra representativa. El muestreo se llevó a cabo en contenedores plásticos pre rotulados, acondicionados y refrigerados para su transporte al laboratorio de acuerdo con el Programa de Monitoreo de Calidad de Efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2013).

Posteriormente se caracterizó para verificar el estado de las aguas residuales. El potencial de hidrógeno (pH) y la demanda química de oxígeno (DQO) se

determinan utilizando el método potenciométrico (ASTM D1293, 2018) según la norma EPA 410.2.1999.

Sistema fotocatalítico

Como se muestra en la Figura 2, el sistema consta de un reactor tipo Bach an escala de laboratorio que incluye una lámpara UV Philips (40w, 254nm) y una superficie metálica cilíndrica opaca para evitar que la radiación UV se transfiera al reactor. Además, los reactores brindarán ayuda. También, tiene una superficie de acero reflectante, tubos concéntricos de silicato de boro (Pyrex) en forma de espiral que sirven como zonas de reacción fotocatalítica, fuentes adicionales de radiación ultravioleta y accesorios para conexiones eléctricas necesarias, como bomba, caja de alimentación, manguera y reactancias electrónicas.



Figura 1. Reactor de tipo Bach

El volumen es de 70 ml/s, la capacidad del vaso es de 1000 ml y el caudal de la bomba de agua es de 11,37 ml/s. Algunos diseños se pueden hacer en

formas rectangulares o cilíndricas, pero se elige la forma cilíndrica para evitar espacios muertos. Su altura es de 1m² y se utilizará el caudal másico junto con el coeficiente DQO y la carga hidráulica utilizada.

Antes de comenzar el proceso fotocatalítico, la mezcla (catalizador más efluente del lecho) se agitó durante 15 minutos para mejorar la adsorción en la superficie del sustrato. Por otro lado, se utiliza hidróxido de sodio para ajustar el valor del pH de la solución de acuerdo con los requisitos del diseño experimental. Después de preparar la mezcla, comenzó el proceso fotocatalítico, que duró 120 minutos.

Diseño experimental

Para evaluar la influencia de las variables de proceso: pH (x1), dióxido de titanio (x2) y peróxido de hidrogeno (x3) sobre la variable respuesta: remoción de DQO (y1), así como para determinar el nivel de las variables que optimicen el tratamiento de aguas residuales. Para esto se aplicó el método de superficie de respuesta con un diseño compuesto central (Gutiérrez y Vara, 2008) y siguiendo la estrategia de experimentación (Anderson y Whitcomb, 2005).

Diseño factorial 2^K con réplica en el punto central

Esta fase consiste en realizar un diseño experimental de primer orden con un punto central para la caracterización preliminar del tipo de superficie de respuesta, detección de posibles curvaturas y verificación del ajuste del modelo a los datos obtenidos.

Se utilizó un diseño factorial (2^3) con réplicas en el punto central del diseño, porque pueden detectar la presencia de curvatura (Gutiérrez y Vara, 2008). Las variables fueron codificadas en 2 niveles (-1, +1), y se incluyó un nivel para el punto central como se muestra en la tabla 2. De igual modo, en la tabla 3 se muestran las corridas experimentales pertenecientes al diseño factorial (2^3), con 4 réplicas en el punto central.

Tabla 1. Variables independientes codificadas con sus respectivos niveles en el diseño experimental de primer orden.

Variable	Nivel bajo (-1)	Punto central (0)	Nivel alto (+1)
X1 [pH]	5	6	7
X2 [TiO ₂]	0.4	0.6	0.8
X3 [H ₂ O ₂]	3.5	5	6.5

Los valores del dióxido de titanio y peróxido de hidrogeno se determinaron en base a investigaciones anteriores (Pariona & Pinedo, 2019); de esta manera se incrementando su rango de evaluación de la variable en estudio.

Tabla 2. Diseño experimental de primer orden.

Tratamiento	Variables codificadas y no codificadas					
	X1	X2	X3	PH	TiO ₂ (mg/100ml)	H ₂ O ₂ 40% (ml/100ml)
1	0	0	0	6.0	0.6	5.0
2	0	0	0	6.0	0.6	5.0
3	-1	1	1	5.0	0.8	6.5

4	1	1	-1	7.0	0.8	3.5
5	0	0	0	6.0	0.6	5.0
6	-1	-1	-1	5.0	0.4	3.5
7	0	0	0	6.0	0.6	5.0
8	1	-1	-1	7.0	0.4	3.5
9	-1	1	-1	5.0	0.8	3.5
10	1	-1	1	7.0	0.4	6.5
11	-1	-1	1	5.0	0.4	6.5
12	1	1	1	7.0	0.8	6.5

Se pretendió encontrar la dependencia de la respuesta (remoción de DQO), en función de las variables bajo estudio. Por este motivo, la variable respuesta se sometió a un análisis de regresión múltiple (método de mínimos cuadrados), del diseño factorial 2^3 , y su función se ajustó a un modelo de primer orden según la ecuación 1.

$$y = b_o + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k + \varepsilon \quad (1)$$

Donde (y) es la variable de respuesta, (b_o) es la constante, ($b_1 b_2 b_k$) son los coeficientes y ($X_1 X_2 X_k$) son los valores de los términos.

Mediante análisis de varianza, se verificó el modelo estimado y la significancia de las variables de estudio, los efectos de curvatura y las interacciones de los coeficientes para determinar si el modelo matemático lineal es suficiente para explicar la respuesta del área experimental y poder hipotetizar cuál está. cerca del área optima. Solo se consideraron significativas aquellas fuentes de variación cuyo estadístico F tiene un valor de probabilidad (probabilidad > F), por debajo del nivel de significancia seleccionado ($\alpha = 0,05$) se consideran significativas).

Por su parte la variable respuesta fue el porcentaje de remoción del DQO, evaluado de acuerdo a la ecuación 2.

$$\% \text{ Remocion} = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100 \quad (2)$$

Donde (Ci) es la concentración de DQO inicial de la muestra en mg/L y (Cf) es la concentración de DQO en mg/L después de 120 minutos de tratamiento.

Diseño compuesto central (DCC)

En la etapa anterior se detecta la presencia de curvatura en el modelo de primer orden. En esta etapa, se realizó un diseño de segundo orden para caracterizar mejor la superficie y modelar la curvatura. Una vez sintonizado el modelo, se determina las condiciones óptimas de operación del proceso (Gutiérrez y Vara, 2008).

El análisis de la superficie de respuesta de segundo orden de la respuesta (y1) se realizó utilizando DCC (diseño compuesto central). Según Montgomery (2011), para 3 factores, el análisis incluyó: 8 puntos factoriales (2^3), 6 puntos en los ejes axiales (a una distancia α) y 4 repeticiones al centro, dando un total de 18 corridas experimentales. Teniendo en cuenta la investigación de Pandia (2020), para determinar la posición de los puntos axiales se consideró ($\alpha = 1.68179$), lo cual garantizó un diseño central compuesto rotatable.

Tabla 3. Variables independientes codificadas con sus respectivos niveles en el diseño central compuesto

Variable	Nivel bajo (-1)	Nivel alto (+1)	Punto Axial		Punto central (0)
			bajo (-1.68)	alto (+1.68)	
X1 [pH]	5	7	4.3	7.68	6
X2 [TiO ₂]	0.4	0.8	0.26	0.936	0.6
X3 [H ₂ O ₂]	3.5	6.5	2.47	7.52	5

Los experimentos se realizaron aleatoriamente para asegurar la validez estadística de los resultados como se ve en la tabla 5. Además se realizaron cuatro replicas en los puntos centrales ($3 \leq n_c \leq 5$), como lo recomienda (Montgomery, 2005).

Tabla 4. Diseño utilizado en la etapa del diseño compuesto central

Tratamientos	Variables independientes					
	X1	X2	X3	PH	TiO ₂ (g/L)	H ₂ O ₂ 40% (ml/l)
1	0	0	0	6	0.6	5
2	-1.681	0	-0	4.31821	0.6	5
3	1	-1	-1	7	0.4	3.5
4	1	1	1	7	0.8	6.5
5	0	0	-1.681	6	0.6	2.47731
6	0	0	0	6	0.6	5
7	-1	1	-1	5	0.8	3.5
8	-1	1	1	5	0.8	6.5
9	0	0	1.681	6	0.6	7.52269
10	0	1.681	0	6	0.9363	5

11	0	0	0	6	0.6	5
12	0	0	0	6	0.6	5
13	1.681	0	0	7.68179	0.6	5
14	1	1	-1	7	0.8	3.5
15	0	-1.681	0	6	0.2636	5
16	1	-1	1	7	0.4	6.5
17	-1	-1	1	5	0.4	6.5
18	-1	-1	-1	5	0.4	3.5

Los valores obtenidos de la variable respuesta observada se sometieron a un análisis de regresión múltiple, donde se ajustó a un modelo de segundo orden que incluía la curvatura de la superficie y la dependencia de la respuesta en función de las variables de investigación. Por lo tanto, a través de DCC, se evaluó en base un modelo de segundo orden, como se muestra en la ecuación 3.

$$y = b_o + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_i X_i^2 + \sum_{i < j} \sum b_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3)$$

El análisis de varianza y las pruebas de significancia de los coeficientes estimados del modelo se realizaron al nivel de significancia $\alpha=0,05$.

De acuerdo con la investigación de Montgomery (2011) y Gutiérrez y Vara (2008), el análisis de varianza establece la significancia estadística del modelo y coeficientes del mismo, además de una falta de ajuste no significativa. Se Utilizó la prueba F de Fisher para determinar la significancia estadística del modelo y el de los coeficientes, teniendo como valor de probabilidad ($\text{prob} > F$) < 0.05 .

Por otro lado, la falta de ajuste del modelo debe de tener un valor de probabilidad ($\text{prob} > F$) $> 0,05$. Así mismo, el coeficiente de determinación (R^2) y

el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustada), tiene que tener un valor cercano a 1.

Optimización de la respuesta en el proceso fotocatalítico

Como lo indica Harrington (1965), el desarrolló el concepto de función de deseabilidad como una solución para combinar las respuestas de múltiples factores en una sola función, proponiendo que 0 es una respuesta indeseable y un valor de 1 indica una respuesta esperada.

Una vez que se obtiene el modelo matemático de segundo orden correspondiente a la respuesta estimada se procedió a la optimización de la misma, lo cual permitió encontrar las mejores condiciones en el tratamiento. Para esto se eligió la combinación de niveles de la variable con el valor D más alto y se selecciona como el mejor tratamiento. Para realizar esta optimización se utilizó el programa estadístico Statistica versión 10.0.

Cinética de degradación

Para los estudios cinéticos, utilizamos las condiciones operativas óptimas proporcionadas por el diseño experimental de la superficie de respuesta. Se tomaron muestras en diferentes tiempos de ejecución del sistema: 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos, y se determinó la concentración de DQO. La ecuación 3 es una expresión no lineal (exponencial) simplificada de la cinética de Langmuir-Hinshelwood, que describe con precisión la degradación de compuestos orgánicos en el proceso fotocatalítico heterogéneo y reduce el error de la ecuación lineal. (Asenjo et al., 2013).

$$C = C_0 \exp(-k_{app} t) \quad (3)$$

Donde C_0 es la concentración inicial (mg/L), C es la concentración (mg/L) en el tiempo t (min) y k_{app} es la constante de velocidad aparente (min^{-1}).

Resultados

Diseño factorial 2^3

Los resultados obtenidos en la Tabla 6 del análisis de varianza de la eficiencia de remoción de DQO del diseño factorial de 2^3 , se encuentra que al nivel de confianza del 95,0%, los efectos estadísticamente significativos tuvieron un valor de $p < 0,05$, fueron los efectos principales (A, B, C) y los efectos de interacción (AB, AC y BC), lo que demostró que las tres variables estudiadas tienen un efecto importante en el proceso, siendo el efecto principal el más importante en la respuesta A. (PH) por tener el mayor valor de Razón-F.

El análisis de varianza también muestra que el efecto de la curvatura es muy significativo, porque el valor obtenido es $< 0,05$. La falta de ajuste también resultó significativa, porque el valor de $p = 0,0001$ fue < 0.05 . En este contexto, Gutiérrez y Vara (2008) mencionan que una falta significativa de adaptación es un fuerte indicador de curvatura, y su presencia puede indicarle al experimentador que está cerca de la condición óptima (Montgomery, 2011).

Tabla 5. Análisis de varianza para la eficiencia de remoción de DQO.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:PH	876.339	1	876.339	20819.78	0.0000

B:Nano partículas TiO ₂	295.124	1	295.124	7011.45	0.0000
C:Peróxido de Hidrogeno	80.4546	1	80.4546	1911.41	0.0000
AB	4.69711	1	4.69711	111.59	0.0018
AC	2.54251	1	2.54251	60.4	0.0044
BC	18.6966	1	18.6966	444.19	0.0002
Curvatura	118.59	1	118.59	1174.80	0.0000
Falta de ajuste	118.87	2	59.4351	1412.04	0.0000
Error puro	0.126275	3	0.0420917		
Total (corr.)	1396.85	11			

R-cuadrada = 0.91, R-cuadrada ajustada= 0.81, Gl: Grados de libertad

El diagrama de Pareto, que se muestra en la Figura 2, es una representación gráfica del ANOVA, que también analiza los factores más influyentes en el orden respectivo de remoción del DQO, las variables pH, las nanopartículas de dióxido de titanio mg/L y el peróxido de hidrogeno ml/L son estadísticamente significativos ($p < 0,05$). Esto significa que estas variables tienen un efecto decisivo en la remoción de DQO. Cualquier efecto que sobrepase la línea será de gran importancia para el proceso.

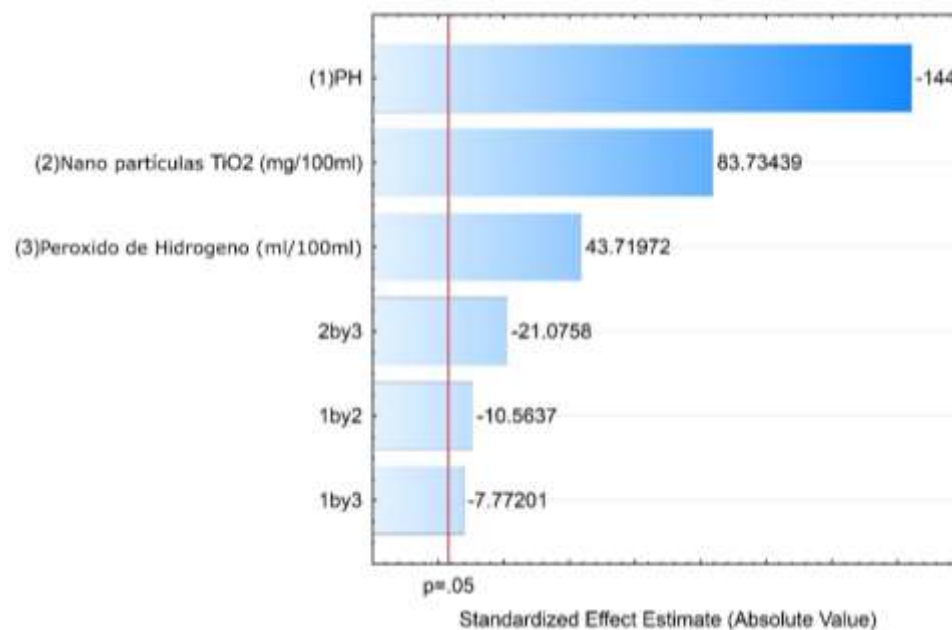


Figura 2. Diagrama de Pareto Estandarizada para la remoción de DQO

Los anteriores resultados indican que un modelo lineal no es suficiente para explicar la relación entre las variables de estudio y las variables de respuesta en la región experimentada elegida. Por lo tanto, es necesario utilizar un modelo cuadrático para explicar completamente la relación entre las variables de estudio y de respuesta.

Diseño compuesto central – Superficie de respuesta

Según el análisis de varianza para la eficiencia de remoción del DQO se observa en la tabla 7, para el nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, indica que los efectos que tuvieron un valor p menor a 0,05 fueron los efectos principales (A, B, C), los efectos interacción AB, AC y BC y los efectos cuadráticos A^2 , B^2 y C^2 . Sólo el efecto de interacción AC no es significativo.

La falta de ajuste resultó no significativa puesto que el valor $p = 0,0584$ es superior al nivel de significancia. Al respecto, Gutiérrez y Vara (2008), mencionan que una falta de ajuste no significativa indica que el modelo de segundo orden se ajusta correctamente a los datos. Esto es corroborado al determinar la calidad de ajuste del modelo de regresión múltiple utilizando el coeficiente de determinación ($R^2=0,994$) y el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{aj}=0,990$). Esto indica que el 99.5% de la variabilidad de los datos se explica por el modelo de segundo orden.

Tabla 6. Análisis de varianza para eficiencia de remoción de DQO en el Diseño Compuesto Central.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:PH	1366.73	1	1366.73	5850.08	0.0000
B:Nano partículas TiO ₂	436.63	1	436.63	1868.94	0.0000
C:Peroxido de Hidrogeno	113.954	1	113.954	487.76	0.0002
AA	237.092	1	237.092	1014.84	0.0001
AB	3.34111	1	3.34111	14.3	0.0324
AC	1.95031	1	1.95031	8.35	0.0630
BB	146.947	1	146.947	628.99	0.0001
BC	17.6121	1	17.6121	75.39	0.0032
CC	8.40342	1	8.40342	35.97	0.0093
Falta de ajuste	9.38221	5	1.87644	8.03	0.0584
Error puro	0.700875	3	0.233625		
Total (corr.)	2273.94	17			

R-cuadrada = 0.9956, R-cuadrada ajustada= 0.9905, Gl: Grados de libertad

La figura 3, muestra una satisfactoria correlación entre los valores experimentales y los predichos.

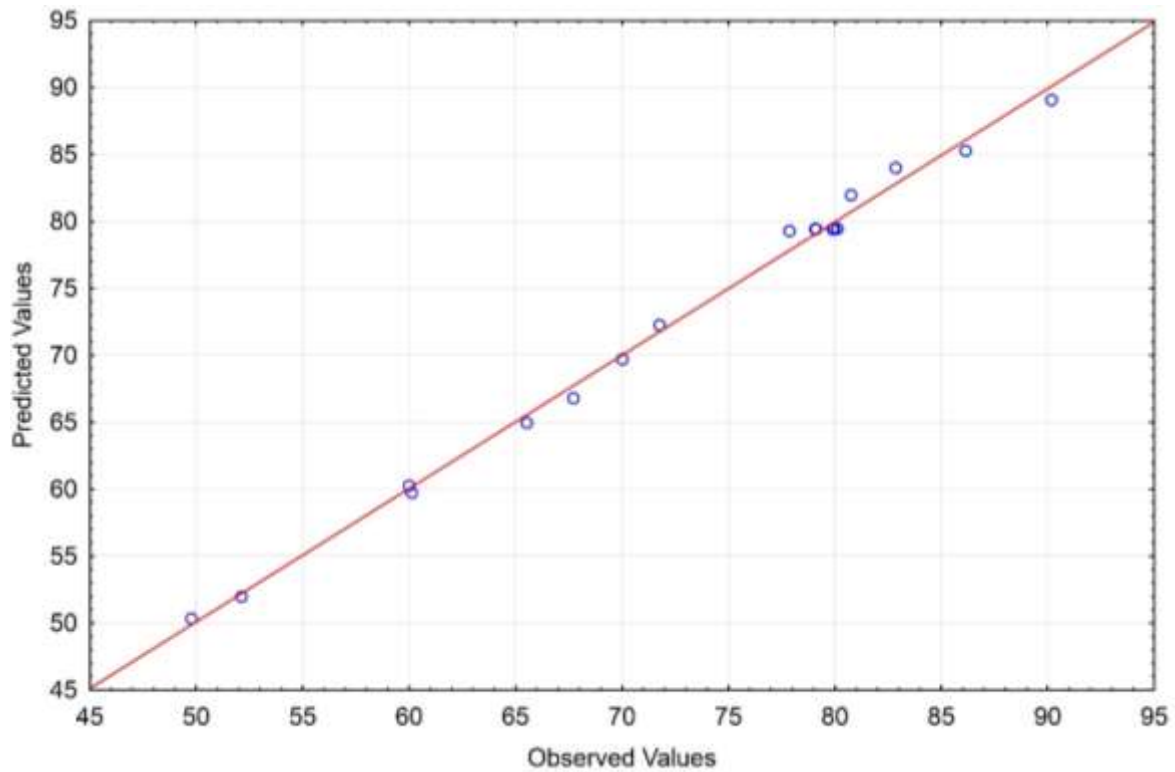


Figura 3. Valores predichos por el modelo cuadrático

Como resultado del análisis de varianza para la eficiencia de eliminación de DQO analizada, se concluyó que el modelo cuadrático propuesto era una aproximación adecuada de los datos para explicar la respuesta del área experimental seleccionada. La ecuación polinómica cuadrática consideró solo los siguientes términos importantes:

$$\begin{aligned}\hat{y} = & -109.201 + 43.8878 A + 174.64 B + 8.51579 C - 4.32941 A^2 \\ & - 3.23125 AB - 85.2095 B^2 - 4.94583 BC \\ & - 0.362255 C^2\end{aligned}$$

La Figura 4 muestra un gráfico de superficie de respuesta para visualizar la relación entre la tasa de eliminación de DQO y las variables de evaluación, pH y concentración de nanopartículas de TiO_2 . Con una concentración cada vez mayor de nanopartículas de TiO_2 , se observaron tasas de eliminación cercanas

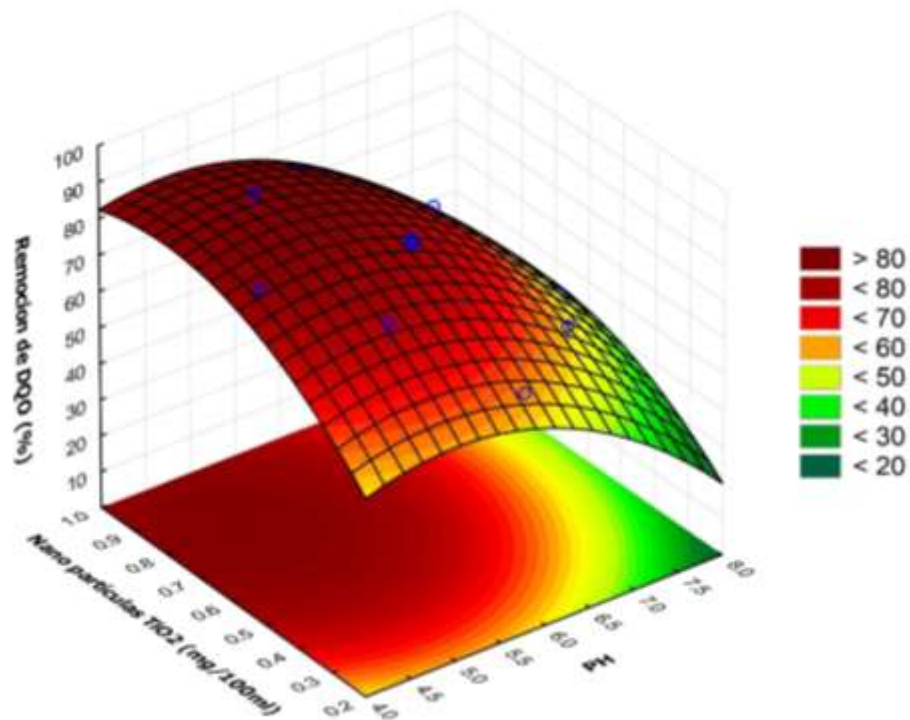


Figura 4. Superficie de respuesta: Nano partículas de TiO_2 - pH (peróxido de hidrogeno 40% 5 ml/L)

a pH 5,5 que arrojaron registros de eliminación de DQO de entre el 78% y el 90%. Esto también se puede ver en el gráfico de contorno (Figura 5), se pueden observar varias regiones de colores, cada región corresponde a las combinaciones de las variables de estudio. Se puede observar que en la zona sombreado de rojo hay una combinación de variables relevantes que logra una tasa de eliminación superior al 70%. Cada gráfico se construye según la ecuación 2, la cual permite visualizar el comportamiento de la variable respuesta y mostrar claramente la combinación de niveles de los factores estudiados que conduce a la máxima remoción en un tiempo de recirculación de 2 horas.

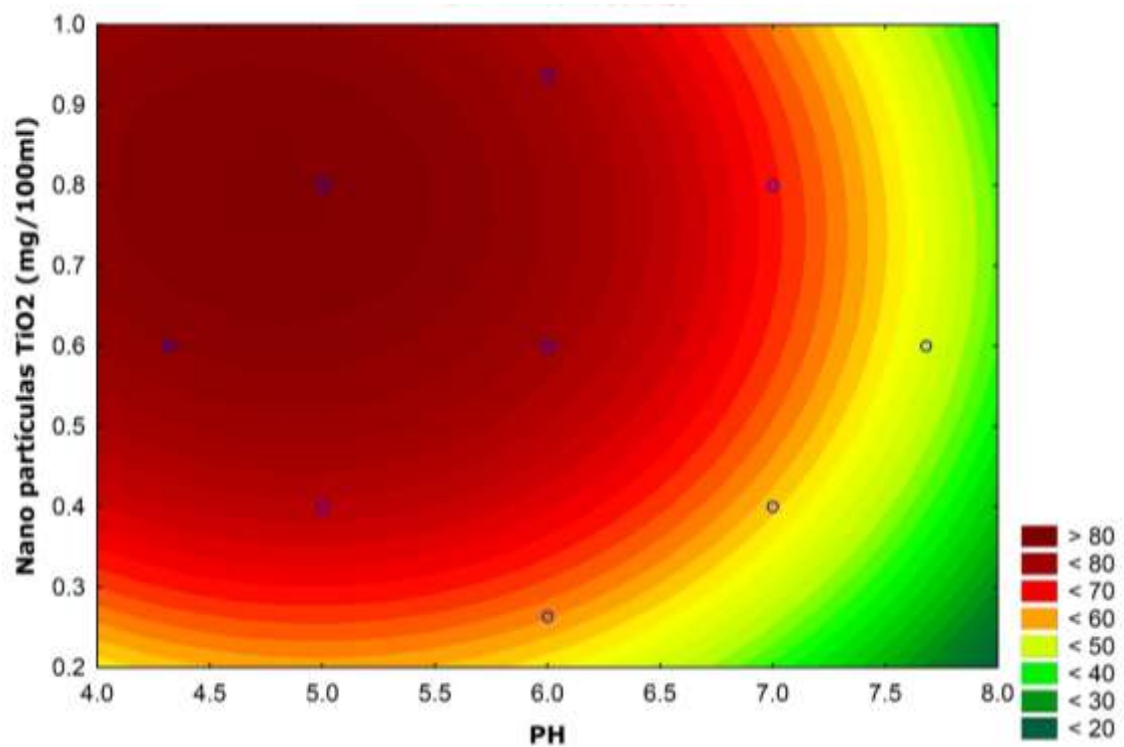


Figura 5. Gráficos de contorno de la superficie de Nano partículas de Tio2 - Ph (peróxido de hidrogeno 40% 5 ml/L)

En la Figura 6 y 7, muestra el gráfico de superficie de respuesta y contornos el cual permite visualizar cómo se relaciona simultánea el pH y concentración de peróxido de hidrogeno sobre la variable respuesta que es la remoción de DQO. Además, se observa que entre el rango de 4ml/L y 7 ml/L de concentración de peróxido de hidrogeno se maximiza el porcentaje de remoción de DQO para un pH de 4.5, obteniéndose registros de remoción superiores al 80%. Todo esto en un tiempo de recirculación de 2 horas.

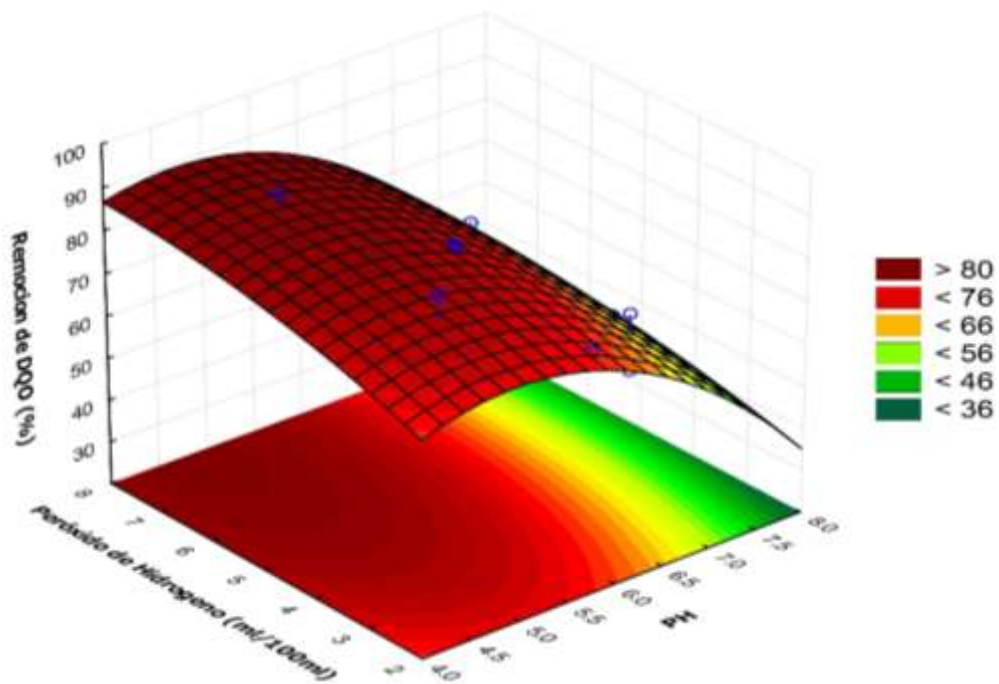


Figura 6. Superficie de respuesta: Peróxido de hidrogeno – PH
(Nano partículas de TiO₂ 0.6)

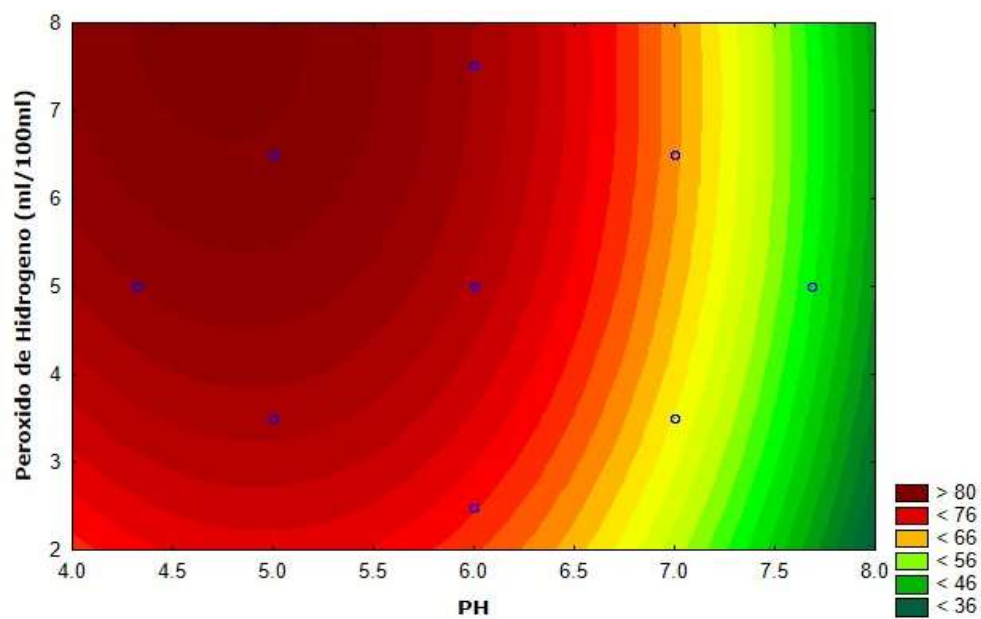


Figura 7. Superficie de respuesta: Peróxido de hidrogeno – PH
(Nano partículas de TiO₂ 0.6)

En la Figura 8, muestra el gráfico de superficie de respuesta donde indica la variación del porcentaje de remoción de DQO frente a las variables de peróxido de hidrogeno y concentración de nano partículas de TiO_2 . Se observa que en concentraciones de TiO_2 de 0.7 y 0.8 mg/100ml se maximiza el porcentaje de remoción de DQO, para concentraciones de peróxido de hidrogeno entre 6 y 8 ml/100ml, obteniéndose registros de remoción superiores al 80%. Adicionalmente en el gráfico de contorno corrobora lo antes mencionado,

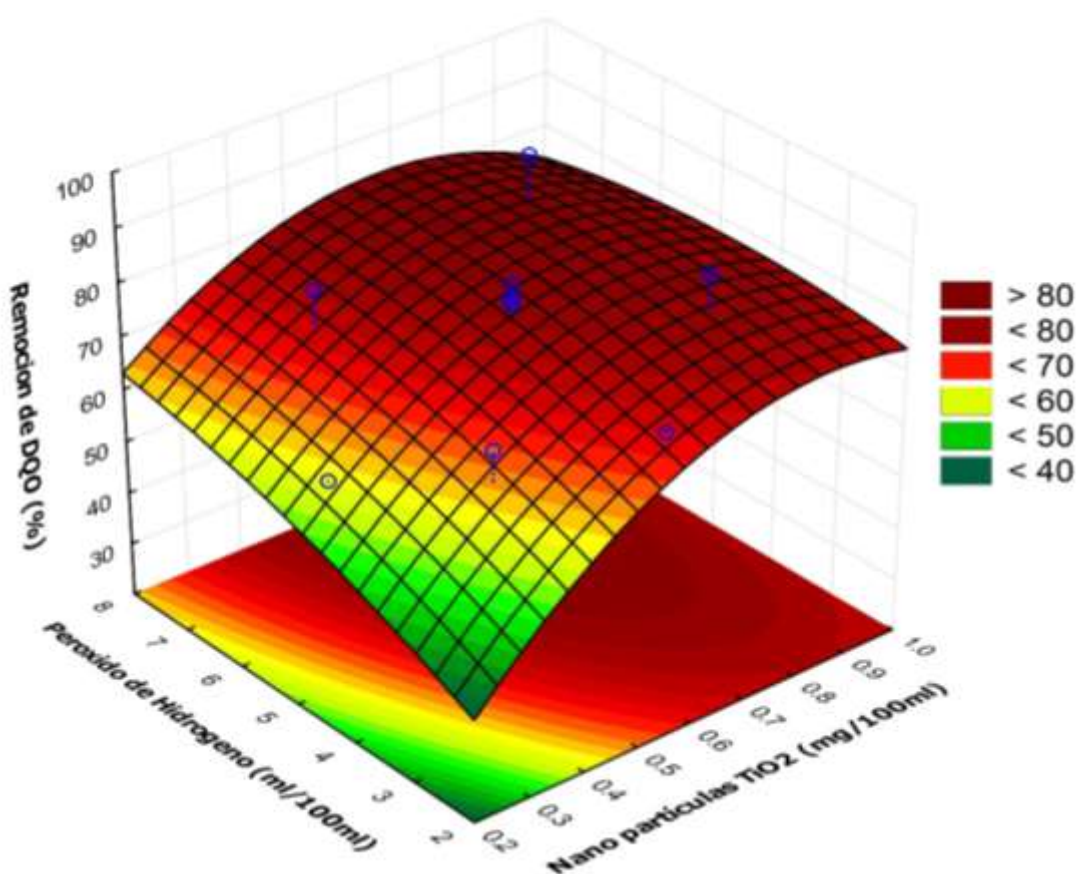


Figura 8. Superficie de respuesta: Nano partículas de TiO_2 - Peróxido de hidrogeno (PH = 6)

mediante la región indicada de color rojo que contiene las combinaciones de las variables de interés que pueden estimar remociones de DQO superiores a 80%.

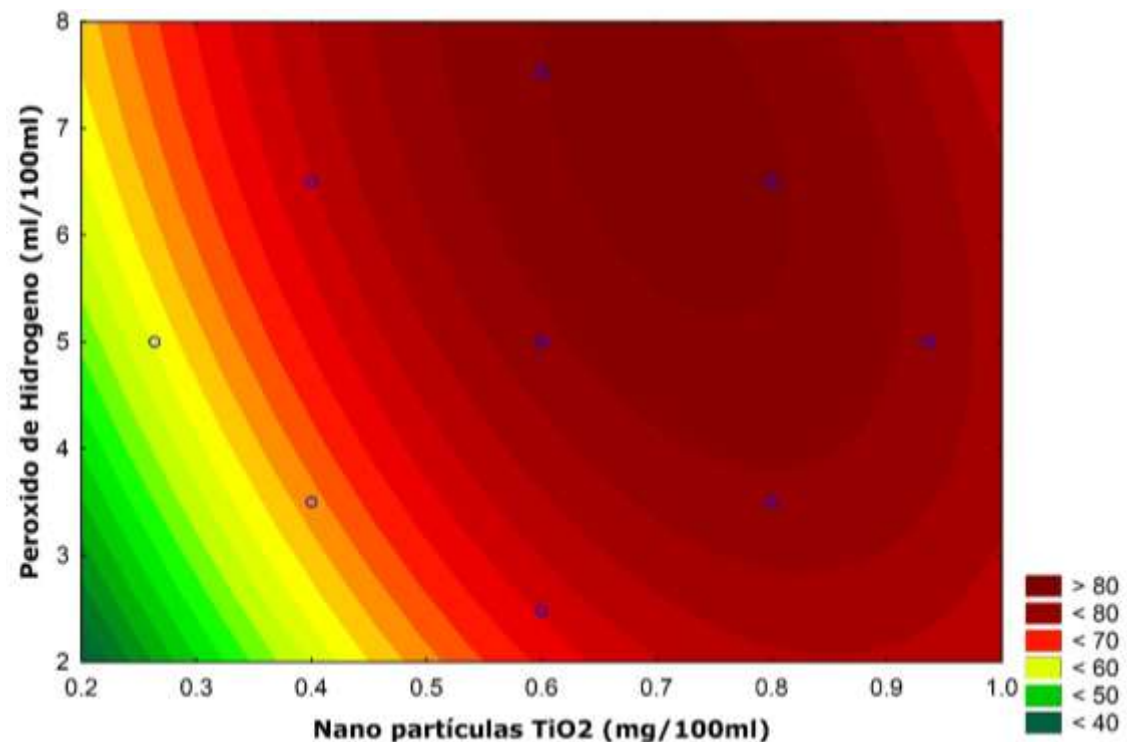


Figura 9. Superficie de respuesta: Nano partículas de TiO_2 - Peróxido de hidrogeno (PH = 6)

Optimización de la respuesta en el proceso fotocatalítico

La optimización de la respuesta simultánea se realizó después de obtener un modelo matemático de segundo orden, correspondiente a la respuesta evaluada. La deseabilidad individual obtenida por el programa Statistica en base a los criterios de optimización escogidos para cada respuesta fue 1. En la figura 10 muestra la solución de optimización, la respuesta estimada y el valor de deseabilidad obtenido, es decir que para obtener el mejor valor óptimo de remoción de DQO (90.17%), el valor óptimo de combinaciones de las variables de ph, nano partículas de TiO_2 y peróxido de hidrogeno son: 4.3 (mg/100ml), 0.768 (ml/100ml) y 7.5 respectivamente.

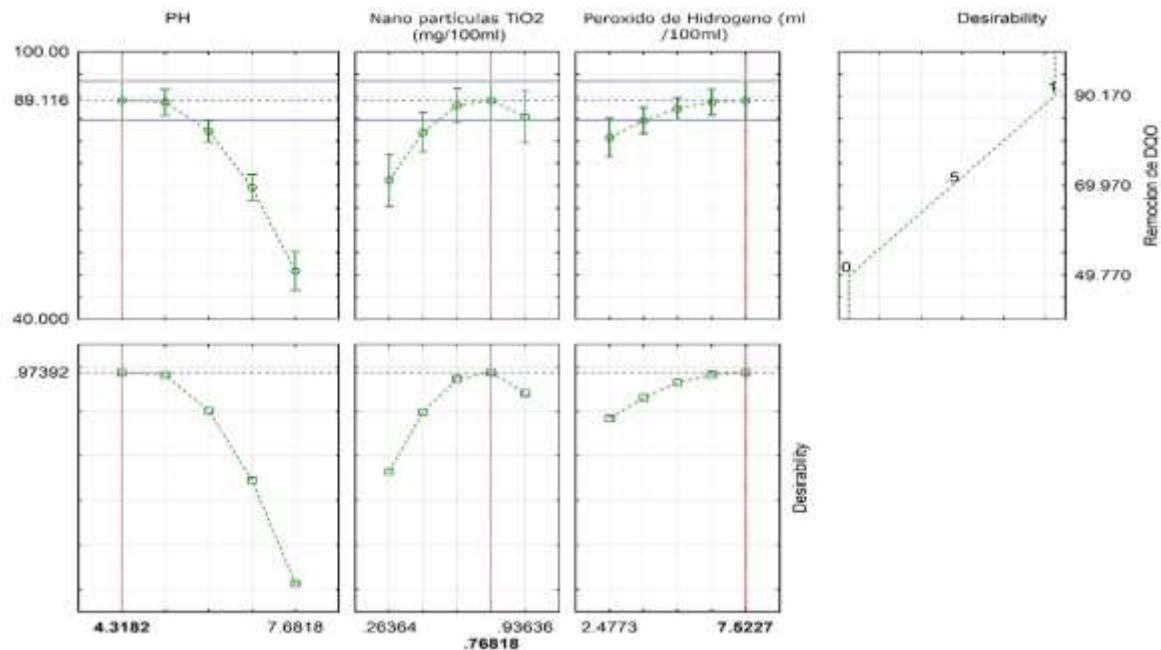


Figura 10. Deseabilidad

Cinética de reacción

La cinética de Langmuir-Hinshelwood de primer orden describe el proceso de degradación fotocatalítica de la DQO en aguas residuales del camal municipal. Para la cinética de reacción se tuvieron los valores óptimos de operación como se muestran la figura 10, la tasa de eliminación del DQO con respecto al tiempo se mostró un comportamiento exponencial ya que los valores experimentales encajan mejor a una ecuación exponencial como se muestra en la figura 11, mientras que la cinética de reacción brindo un coeficiente de determinación R de 0,9892, esto afirma que el modelo asegura confiabilidad en la constante de velocidad. Además, se mostró que la velocidad aparente (k_{app}) fue de 0,0177186 min⁻¹, indicando una mayor tasa de eliminación hasta los 120 min iniciales, luego a ello disminuyo de manera notable, todo esto bajo una exposición constante de 40W 254nm de luz UV.

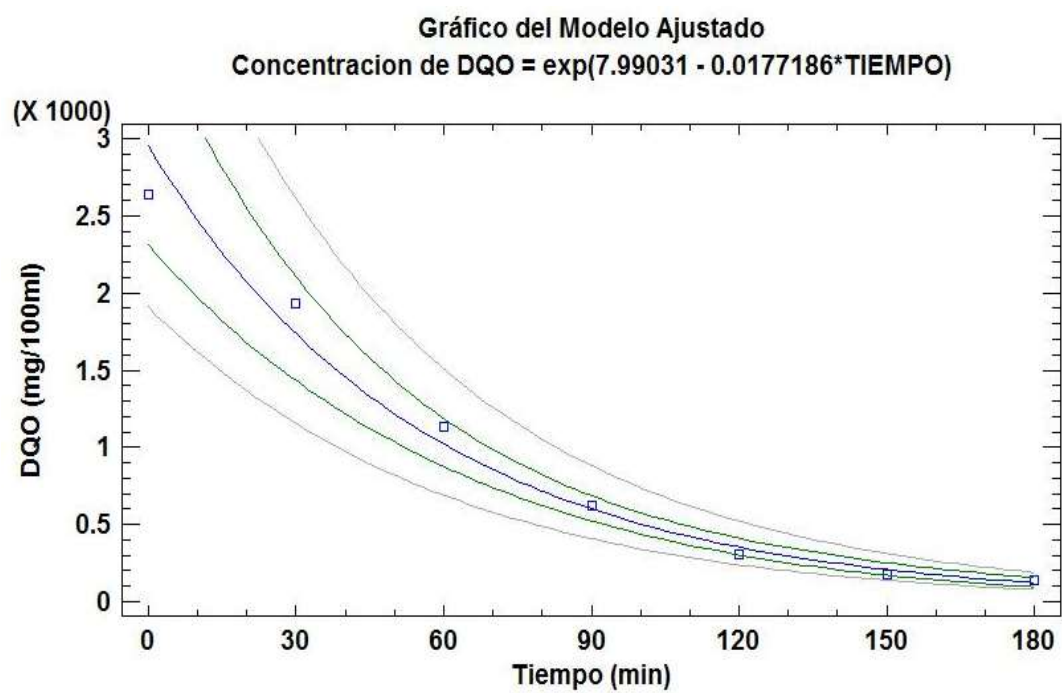


Figura 11. Cinética de reacción

Discusión

La fotocátalisis heterogénea representa una forma avanzada de oxidación caracterizada por su dependencia de la capacidad oxidativa del radical hidroxilo, característica común de estos procesos. En este enfoque particular, los radicales hidroxilos se generan principalmente por la activación fotoquímica del dióxido de titanio con luz ultravioleta (Blesa, 2001; Leguizamon, 2010). El dióxido de titanio actúa como semiconductor y forma una brecha de energía de casi 2,4 eV. Esta energía se puede lograr mediante fotones en luz ultravioleta. A diferencia de la luz visible, que no tiene la energía necesaria para este proceso, la luz ultravioleta es imprescindible. Por ello se utilizan lámparas UV o, alternativamente, energía solar. El uso de la energía solar no sólo ha demostrado ser eficaz en varios estudios, sino que añade valor a dicha tecnología por su sostenibilidad y eficiencia energética, lo que resulta de interés en varios estudios (Blesa, 2001).

Estudios anteriores muestran que la fotocátalisis heterogénea ajustando el pH, el dióxido de titanio (TiO_2) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) dio resultados suficientes para eliminar la demanda química de oxígeno (DQO) y varios componentes de las aguas residuales. Deza, Osorio y Manrique (2017) encontraron resultados significativos en la degradación fotocatalítica del tinte azul Cibacron Navy H-2G utilizando nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2). El estudio evaluó la degradación fotocatalítica variando la masa del fotocatalizador (0,1 g a 1,0 g), la concentración del tinte (20 ppm a 100 ppm) y el valor del pH (2 a 10,5). Los mejores resultados se obtuvieron con una masa de nanopartículas de TiO_2 de 0,6 g, una concentración de colorante de 20 ppm y

un valor de pH de 4 (Deza, Osorio y Manrique, 2017). Este hallazgo está relacionado con lo demostrado en los resultados de la investigación. Por otro lado, Machuca y Colina (2011) evaluaron la degradación fotocatalítica de tres pesticidas comerciales (2,4-D, diurón, ametrina) analizando el efecto del pH inicial y la concentración del catalizador de TiO_2 para cada muestra, así como la modelación de la cinética de degradación en condiciones operativas óptimas para cada proceso de mineralización. Se encontró que la concentración del catalizador es la variable más importante en la degradación del 2,4-D, mientras que el pH inicial fue el factor más importante para el diurón, el ametrino y la mezcla observada. Las mejores condiciones operativas para la reducción de carbono orgánico (TOC) fueron: para 2,4-D, pH inicial de 5 y concentración de catalizador (TiO_2) de 0,6 g/l; diurón pH inicial 7 y 0,6 g/l; ametrina pH inicial 9 y 0,6 g/l; y mezcla de pesticidas pH 7 y 0,6 g/l. Además, el parámetro cinético mostró $4.36, 8.31, 8.49$ y $10.28 \text{ k}_{\text{app}} \times 10^3 \text{ (mol/L} \cdot \text{min)}$ para 2,4-D, diurón, ametrin y la mezcla, respectivamente (Machuca y Colina, 2011). Así, se demostró que el pH y la concentración de TiO_2 influyen en la degradación fotocatalítica y los parámetros cinéticos observados en el estudio. De manera similar, Santiago (2018) evaluó la eliminación de fenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) de aguas residuales municipales utilizando nanopartículas de TiO_2 de modo que la máxima eficiencia de degradación del fenol medida por DQO fue del 37,68% a una concentración de TiO_2 de 150 mg/L. tiempo de exposición a la radiación UV-Vis 3 horas. Por lo tanto, este estudio destaca la utilidad del TiO_2 en la degradación del DQO, pero el estudio pudo lograr una eliminación de la DQO de más del 70 %, incluidos los controles de pH y peróxido de hidrógeno. De manera similar, Tolentino (2017) determinó un proceso de oxidación fotocatalítica

utilizando TiO_2 y luz ultravioleta para tratar el agua de lavandería de modo que la concentración de TiO_2 , el tiempo de recirculación, el pH, la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los tensioactivos, se logro la eficiencia de reducción del DQO sin la presencia de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) del 34,21%; mientras que en presencia de H_2O_2 se obtuvo una degradación máxima del 35,27%. Estudios recientes de Santiago (2018) y Tolentino (2017) encontraron niveles menores de remoción en el estudio, pero esto se debió a que no tuvieron control sobre el diseño del estudio y no se enfocaron en optimizar de cada una de las variables de intervención. Pero a pesar de ello, se ha demostrado que si existe un impacto en la remoción de DQO.

Según la investigación, se descubrió que la fotocatálisis heterogénea con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) es un método avanzado y prometedor para el tratamiento de aguas residuales. Esta tecnología destaca por su capacidad para degradar eficazmente una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluidos patógenos y compuestos químicos resistentes. La acción de las nanopartículas de TiO_2 en la luz ultravioleta produce radicales libres, que son agentes poderosos para descomponer los contaminantes. Este proceso no sólo es muy eficiente, sino también respetuoso con el medio ambiente porque reduce la generación de subproductos nocivos, un problema común con otros métodos de tratamientos. Además, el TiO_2 es muy estable y puede reutilizarse en múltiples ciclos de tratamiento, lo que lo hace económicamente viable a largo plazo. A diferencia de otros procesos que pueden requerir productos químicos adicionales o condiciones específicas, la fotocatálisis de TiO_2 es relativamente simple y puede funcionar en condiciones

ambientales normales. Este método representa un equilibrio entre eficiencia, sostenibilidad y practicidad y ofrece una solución completa para el tratamiento avanzado de aguas residuales de acuerdo con los crecientes estándares ambientales y la necesidad de preservar los recursos.

Conclusiones

Se ha demostrado que la fotocatalisis heterogénea de nanopartículas de TiO_2 es un método eficaz de tratamiento de aguas residuales, capaz de descomponer eficazmente una remoción del DQO. El dióxido de titanio actúa bajo la luz ultravioleta para generar radicales libres, lo que convierte al proceso en un poderoso agente de degradación de contaminantes y conocido por su alta eficiencia.

Con respecto al caso de tratamiento de aguas residuales de camal se encontró que medida que aumenta la concentración de nano partículas de TiO_2 se maximizó el porcentaje de remoción, superando una remoción por encima a 70%, para pH cercanos a 5.5 (peróxido de hidrogeno 40% 5 ml/L y tiempo de recirculación de 2 horas). A su vez, entre el rango de 4ml/L y 7 ml/L de concentración de peróxido de hidrogeno se maximiza el porcentaje de remoción de DQO para un pH de 4.5, con una remoción superior al 80% (Nano partículas de TiO_2 0.6 y tiempo de recirculación de 2 horas). Además, se encontró que concentraciones de TiO_2 de 0.7 y 0.8 mg/100ml maximiza el porcentaje de remoción de DQO, para concentraciones de peróxido de hidrogeno entre 6 y 8 ml/100ml, obteniéndose una remoción que supera al 80% (pH=6 y tiempo de recirculación de 2 horas). Finalmente, el valor óptimo de remoción de DQO (90.17%) se obtuvo con un ph de 4.3 mg/100ml, nano partículas de TiO_2 a 0.768 ml/100ml y peróxido de hidrogeno a 7.5 ml/L.

Además, el método fotocatalítico heterogéneo es respetuoso con el medio ambiente ya que minimiza la generación de subproductos nocivos, un problema

común en otros métodos de tratamiento de aguas residuales. La estabilidad y reutilización del TiO_2 durante múltiples ciclos de tratamiento lo convierten en una opción económicamente viable a largo plazo. Además, la fotocatálisis de TiO_2 es un proceso relativamente simple que puede operar en condiciones ambientales normales, lo que representa un equilibrio entre eficiencia, sostenibilidad y practicidad. Proporciona soluciones integrales para el tratamiento avanzado de aguas residuales que cumplen con los crecientes estándares ambientales y las necesidades de conservación de recursos.

Referencias Bibliográfica

- Agua en Centroamérica. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Recuperado de <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>
- Arroyave, J. A., Garces, L. F., & Cruz, A. F. (2015). Fotodegradacion de las aguas residuales con pesticida Mertec en la industria bananera empleando Fotocatalisis con Dióxido de Titanio y Lampara de Luz Ultravioleta (Vol. 4). México: Revista lasallista de investigación.
- Cisterna, P. y Peña, D. (2002). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. Recuperado de <https://bit.ly/2h755a0>
- Cisterna, P. y Peña, D. (2002). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. Recuperado de <https://bit.ly/2h755a0>
- Chou, W., Wang, C., & Chang, S. (2009). Study of COD and turbidity removal from real oxide-CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption. Journal of Hazardous Materials, 168(2–3), 1200–1207. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.163>

Casamachin, F. (2012). Evaluación de la foto-oxidación de ácido dicloro acético empleando peróxido de hidrogeno como agente oxidante en un reactor Batch. Santiago de Cali.

Deza, E., Osorio, A., y Manrique, J. (2017). Evaluación experimental de la degradación fotocatalítica del colorante Cibacron Navy H-2G empleando nanopartículas industriales de TiO₂. Revista de la Sociedad Química del Perú 83(2). pp. 160-173. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v83n2/a03v83n2.pdf>

Edison Gil. (2004). Oxidacion fotocatalitica de aguas residuales de la industria de lavanderia utilizando TiO₂ como catalizador y luz UV. Universidad EAFIT de Bogota: Colombia.

F. Machuca-Martínez, J. Colina-Márquez, "Effect of the initial pH and the catalyst concentration on TiO₂-based photocatalytic degradation of three commercial pesticides", Ingeniería & Desarrollo, vol. 29, pp. 84-100, 2011

Hernández, D. (2016). Tratamiento acoplado fisicoquímico-electrocoagulación para incrementar la remoción de la materia orgánica de un agua residual de rastro municipal (maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, México. Recuperado de <https://bit.ly/31WonD4>

J. Zhang, D. Fu, Y. Xu, C. Liu, "Optimization of parameters on photocatalytic degradation of chloramphenicol using TiO₂ as photocatalyst by response surface methodology", Journal of Environmental Sciences-China, vol. 22, pp. 1281-1289, 2010. doi: 10.1016/S1001-0742(09)60251-5

Leguizamon, J. (2010). FOTSENSIBILIZACIÓN DE TiO_2 CON UN COLORANTE COMERCIAL PARA FOTODEGRADACION DE CONTAMINANTES ORGANICOS DEL AGUA. *Actualidad & Divulgación Científica*, 6.

M. Blesa, Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea, Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires, Argentina, 2001.

Oré, A. (2017). Influencia del sulfato de aluminio y ph en la remoción de la materia orgánica para el tratamiento del agua residual del camal municipal de Chupaca. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú. Recuperado de <https://bit.ly/30JJ1WI>

Organización Industrial. (2008). Vertidos de los mataderos e industrias cárnicas. Recuperado de <https://www.eoi.es/es/file/18141/download?token=aIBsydFb>

Paitan, M. y Sifuentes, G. (2018). Remoción de contaminantes de aguas residuales de un matadero de equinos por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio. Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de <https://bit.ly/30AI04C>

Santambrosio, E., Orteaga, M. y Garibaldi, P. (2002). Demanda Bioquímica de Oxígeno. Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Recuperado de <https://bit.ly/2ZrrOQB>

Santiago Talenas, J. C. (diciembre de 2017). Estudio de la viabilidad del uso de nanoparticulas de dióxido de titanio en el tratamiento de aguas residuales

domesticasa nivel de laboratorio en la facultad de ingeniería química y textil de la universidad nacional de ingeniería. Huanuco.

Tolentino A. (2017). Proceso de oxidación fotocatalítica mediante Dioxido de Titanio (TiO_2) y luz Ultravioleta (UV) para el tratamiento del agua residual de la lavandaria del Instituto Nacional de la Salud del Niño, San Borja.

Figuras y Tablas

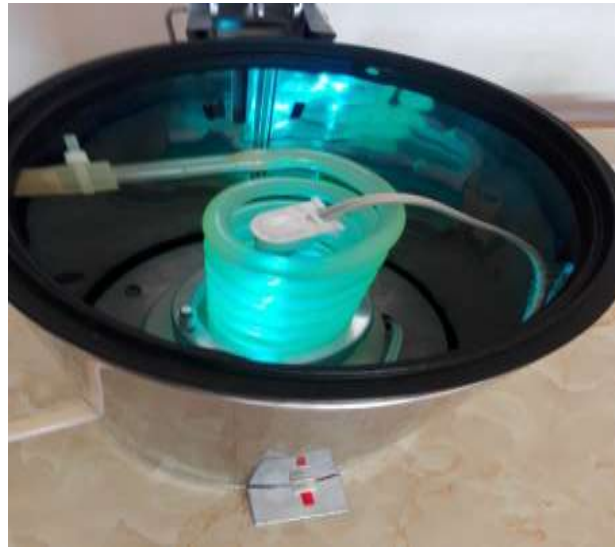


Figura 6. Reactor de tipo Bach

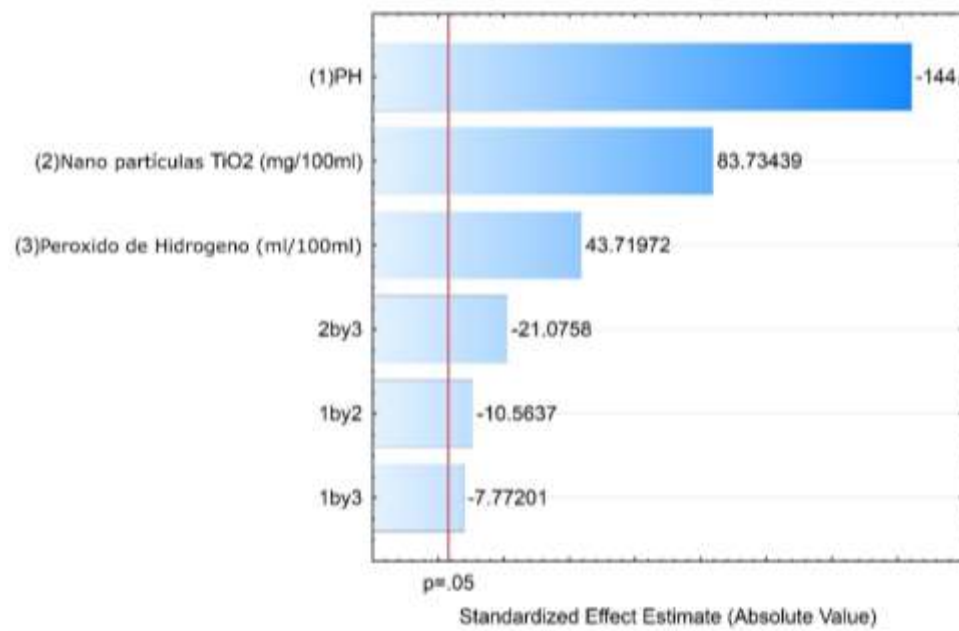


Figura 7. Diagrama de Pareto Estandarizada para la remoción de DQO

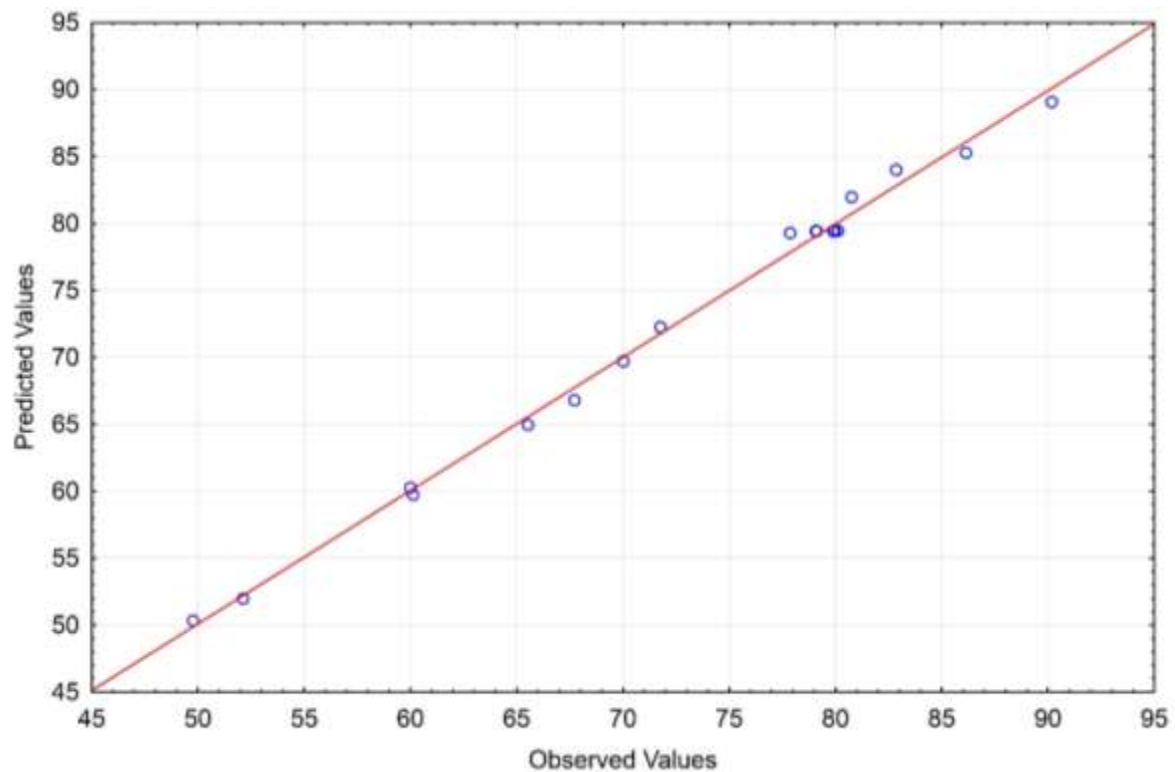


Figura 8. Valores predichos por el modelo cuadrático

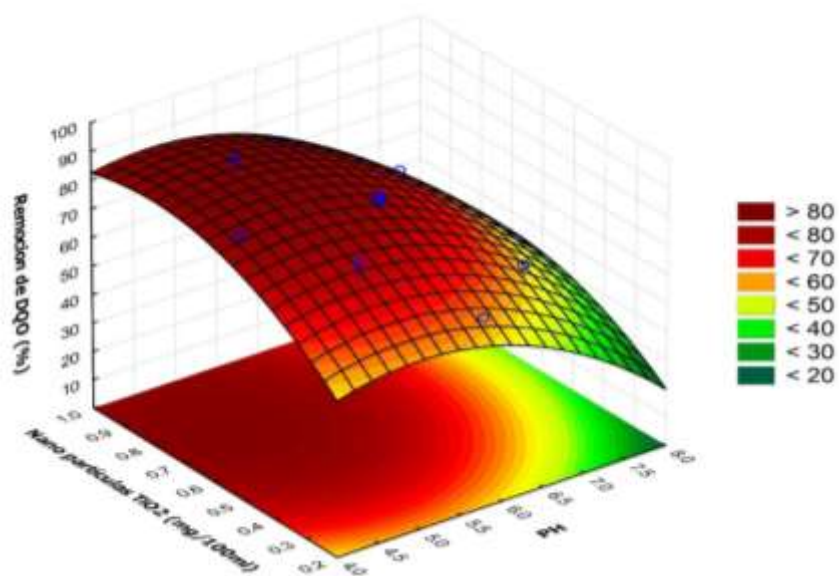


Figura 9. Superficie de respuesta: Nano partículas de TiO_2 - pH (peróxido de hidrogeno 40% 5 ml/L)

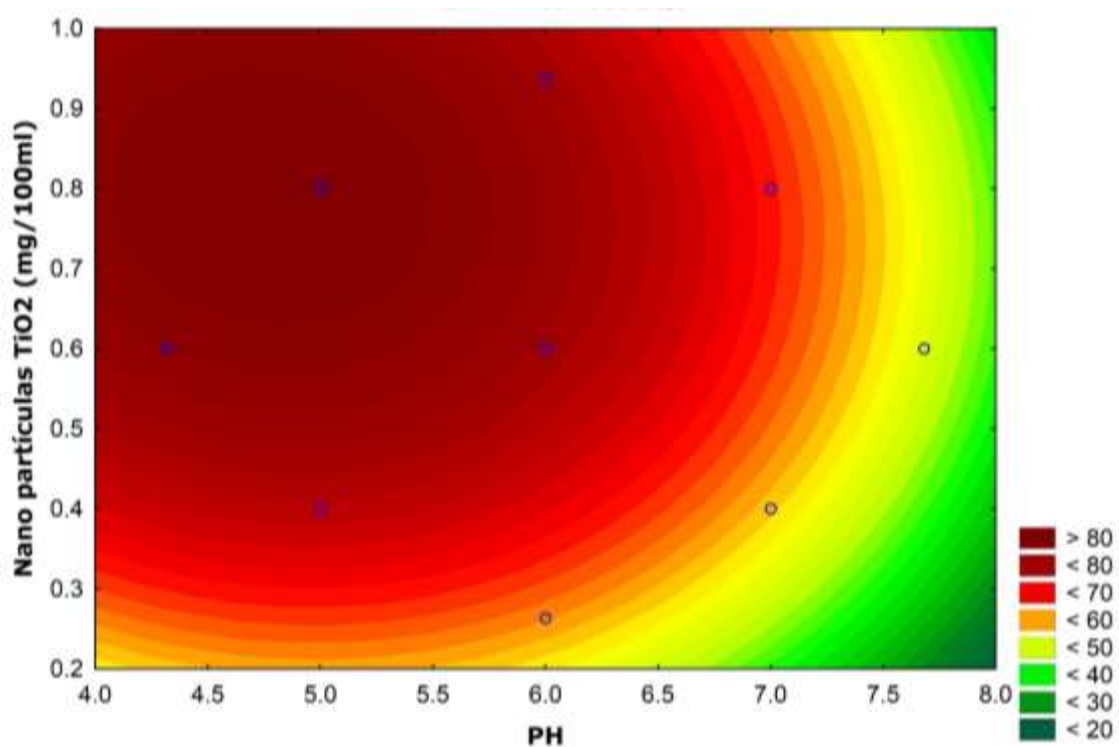


Figura 10. Gráficos de contorno de la superficie de Nano partículas de TiO₂ - Ph (peróxido de hidrogeno 40% 5 ml/L)

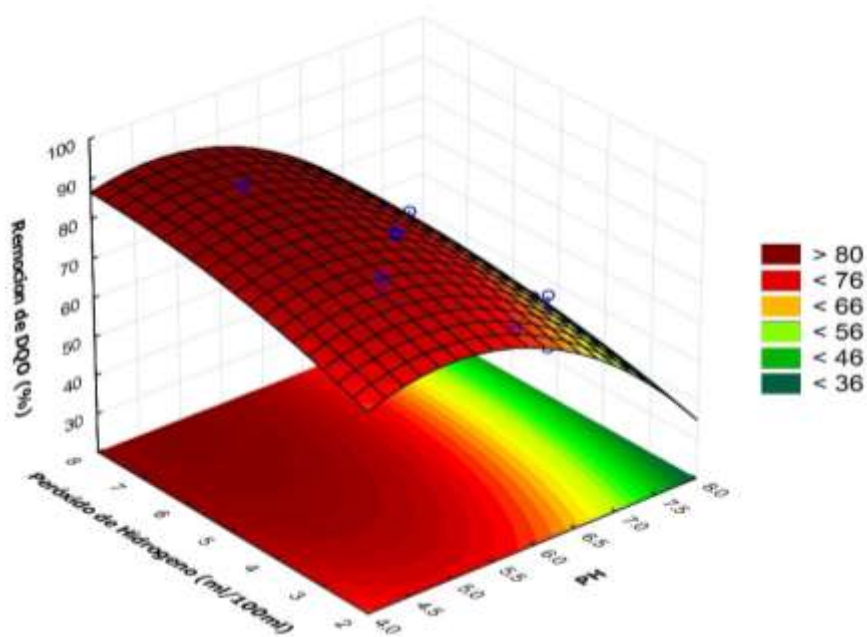


Figura 6. Superficie de respuesta: Peróxido de hidrogeno – PH (Nano partículas de TiO₂ 0.6)

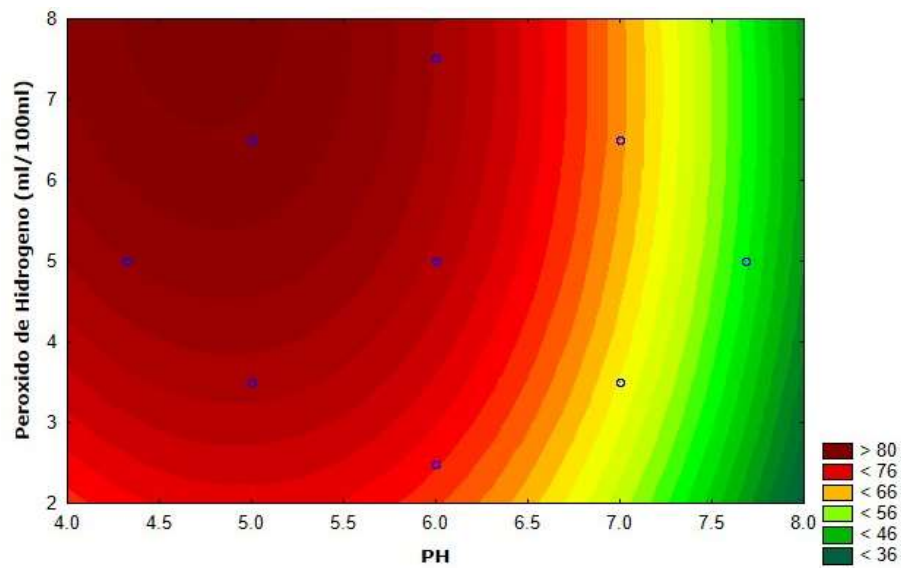


Figura 7. Superficie de respuesta: Peróxido de hidrogeno – PH
(Nano partículas de TiO₂ 0.6)

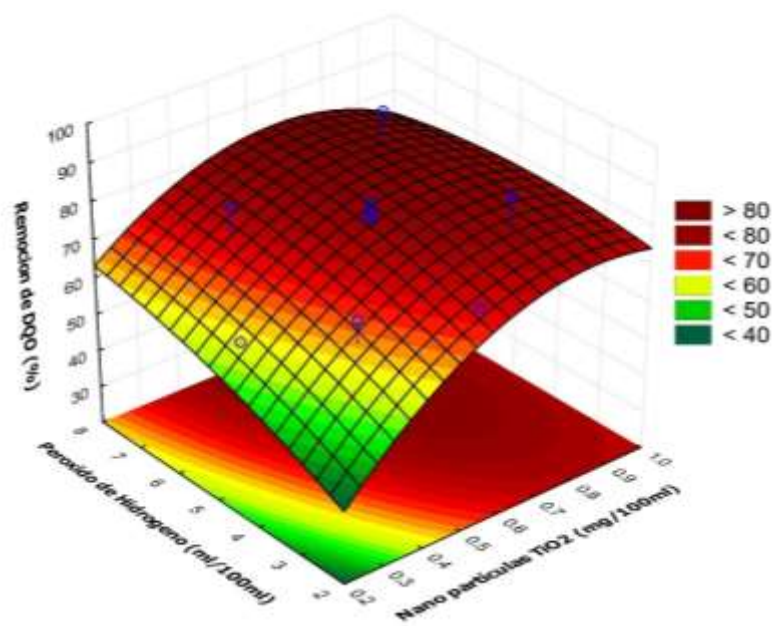


Figura 8. Superficie de respuesta: Nano partículas de Tio₂ - Peróxido de hidrogeno (PH = 6)

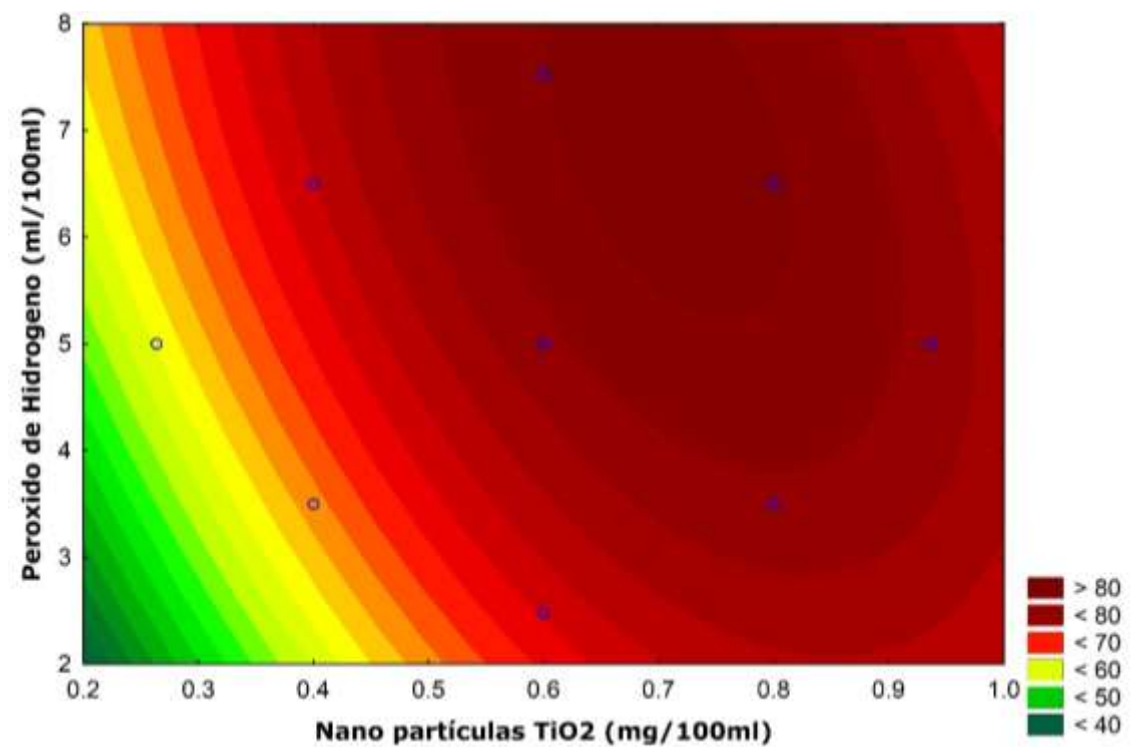


Figura 9. Superficie de respuesta: Nano partículas de Tio2 - Peróxido de hidrogeno (PH = 6)

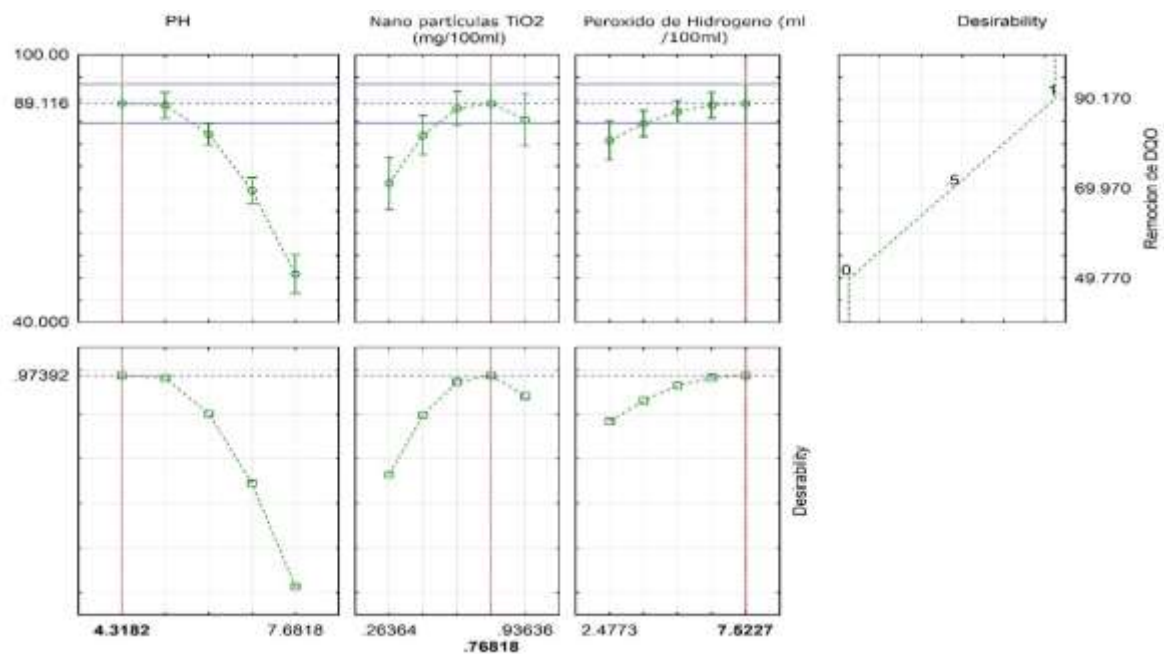


Figura 10. Deseabilidad

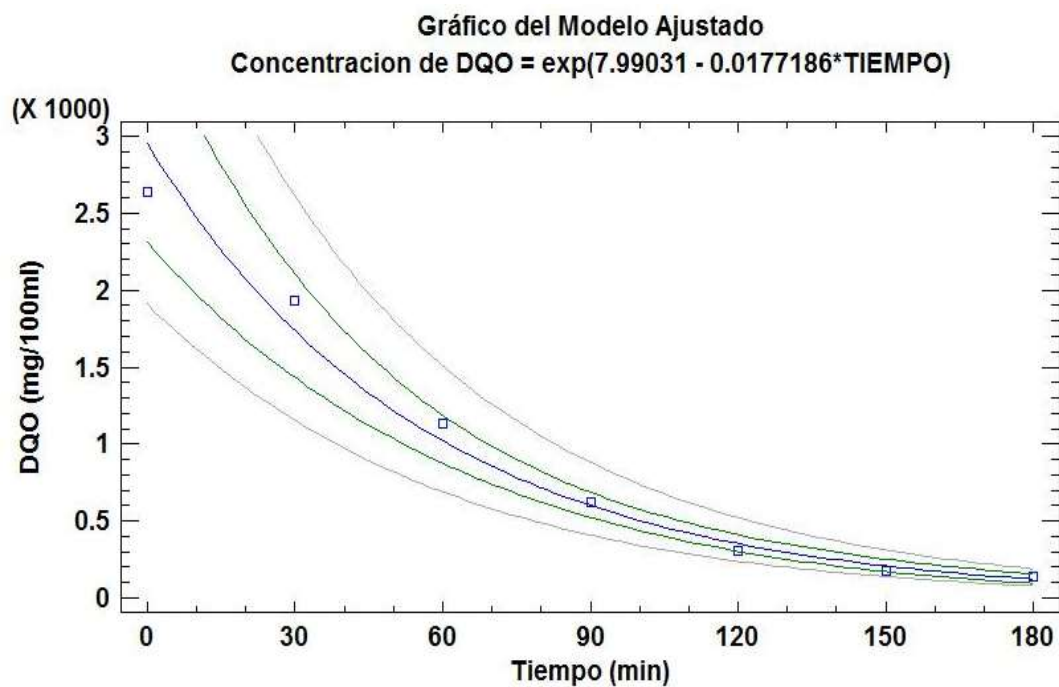


Figura 11. Cinética de reacción

Tabla 1. Variables independientes codificadas con sus respectivos niveles en el diseño experimental de primer orden.

Variable	Nivel bajo (-1)	Punto central (0)	Nivel alto (+1)
X1 [pH]	5	6	7
X2 [TiO ₂]	0.4	0.6	0.8
X3 [H ₂ O ₂]	3.5	5	6.5

Tabla 2. Diseño experimental de primer orden.

Tratamiento	Variables codificadas y no codificadas					
	X1	X2	X3	PH	TiO2 (mg/100ml)	H2O2 40% (ml/100ml)
1	0	0	0	6.0	0.6	5.0
2	0	0	0	6.0	0.6	5.0
3	-1	1	1	5.0	0.8	6.5
4	1	1	-1	7.0	0.8	3.5
5	0	0	0	6.0	0.6	5.0
6	-1	-1	-1	5.0	0.4	3.5
7	0	0	0	6.0	0.6	5.0
8	1	-1	-1	7.0	0.4	3.5
9	-1	1	-1	5.0	0.8	3.5
10	1	-1	1	7.0	0.4	6.5
11	-1	-1	1	5.0	0.4	6.5
12	1	1	1	7.0	0.8	6.5

Tabla 3. Variables independientes codificadas con sus respectivos niveles en el diseño central compuesto

Variable	Nivel bajo (-1)	Nivel alto (+1)	Punto Axial		Punto central (0)
			bajo (-1.68)	alto (+1.68)	
X1 [pH]	5	7	4.3	7.68	6
X2 [TiO2]	0.4	0.8	0.26	0.936	0.6
X3 [H2O2]	3.5	6.5	2.47	7.52	5

Tabla 4. Diseño utilizado en la etapa del diseño compuesto central

Tratamientos	Variables independientes					
	X1	X2	X3	PH	TiO2 (g/L)	H2O2 40% (ml/l)
1	0	0	0	6	0.6	5
2	-1.681	0	-0	4.31821	0.6	5
3	1	-1	-1	7	0.4	3.5
4	1	1	1	7	0.8	6.5
5	0	0	-1.681	6	0.6	2.47731
6	0	0	0	6	0.6	5
7	-1	1	-1	5	0.8	3.5
8	-1	1	1	5	0.8	6.5
9	0	0	1.681	6	0.6	7.52269
10	0	1.681	0	6	0.9363	5
11	0	0	0	6	0.6	5
12	0	0	0	6	0.6	5
13	1.681	0	0	7.68179	0.6	5
14	1	1	-1	7	0.8	3.5
15	0	-1.681	0	6	0.2636	5
16	1	-1	1	7	0.4	6.5
17	-1	-1	1	5	0.4	6.5
18	-1	-1	-1	5	0.4	3.5

Tabla 5. Análisis de varianza para la eficiencia de remoción de DQO.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:PH	876.339	1	876.339	20819.78	0.0000
B:Nano partículas TiO2	295.124	1	295.124	7011.45	0.0000
C:Peróxido de Hidrogeno	80.4546	1	80.4546	1911.41	0.0000
AB	4.69711	1	4.69711	111.59	0.0018
AC	2.54251	1	2.54251	60.4	0.0044
BC	18.6966	1	18.6966	444.19	0.0002
Curvatura	118.59	1	118.59	1174.80	0.0000
Falta de ajuste	118.87	2	59.4351	1412.04	0.0000

Error puro	0.126275	3	0.0420917
Total (corr.)	1396.85	11	

R-cuadrada = 0.91, R-cuadrada ajustada= 0.81, Gl: Grados de libertad

Tabla 6. Análisis de varianza para eficiencia de remoción de DQO en el Diseño

Compuesto Central.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:PH	1366.73	1	1366.73	5850.08	0.0000
B:Nano partículas TiO ₂	436.63	1	436.63	1868.94	0.0000
C:Peroxido de Hidrogeno	113.954	1	113.954	487.76	0.0002
AA	237.092	1	237.092	1014.84	0.0001
AB	3.34111	1	3.34111	14.3	0.0324
AC	1.95031	1	1.95031	8.35	0.0630
BB	146.947	1	146.947	628.99	0.0001
BC	17.6121	1	17.6121	75.39	0.0032
CC	8.40342	1	8.40342	35.97	0.0093
Falta de ajuste	9.38221	5	1.87644	8.03	0.0584
Error puro	0.700875	3	0.233625		
Total (corr.)	2273.94	17			

R-cuadrada = 0.9956, R-cuadrada ajustada= 0.9905, Gl: Grados de libertad

ANEXOS 1. Evidencia de sumisión del artículo en una revista de prestigio.

Tecnología y ciencias del agua

[← Volver a Envíos](#)

Enviar un artículo

1. Inicio

2. Cargar el envío

3. Introducir los metadatos

4. Confirmación

5. Sigüientes pasos

Archivos

Carta de originalidad TyCA_opima.doc

ARCHIVO

Editar

Eliminar

Manuscrito_Fotocatálisis heterogénea mediante nanopartículas.docx

Texto del artículo

Editar

Eliminar

Añadir archivo

Guardar y continuar

Cancelar

Tecnología y ciencias del agua

[← Volver a Envíos](#)

Enviar un artículo

1. Inicio

2. Cargar el envío

3. Introducir los metadatos

4. Confirmación

5. Sigüientes pasos

Prefijo

un

Ejemplos: univuno, elito

Título *

Fotocatálisis heterogénea mediante Nanopartículas de TiO2 para el tratamiento de aguas residuales

Subtítulo

Resumen *

El resumen debe tener 250 palabras o menos.

1. Inicio 2. Cargar el envío 3. Introducir los metadatos 4. Confirmación 5. Sigüientes pasos

Prefijo
 
 Ejemplos: un/una, el/la

Título *
 

Subtítulo

Resumen *
 El resumen debe tener 250 palabras o menos.

  **B** *I* U                           

Este estudio valoró la eficiencia de un proceso fotocatalítico heterogéneo utilizando nanopartículas de dióxido de titanio en el tratamiento de aguas residuales del canal municipal, evaluando la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO). Para su desarrollo experimental se aplicó un control de variables tales como el potencial de hidrógeno, del peróxido de hidrogeno y del dióxido de titanio. Se realizó una comparación entre un diseño factorial de 2³ con réplica de punto central y un diseño

Nombre	Correo electrónico	Rol	Contacto principal	En listas de navegación
• Crishtian Ayala-Vasquez	crishtianayala@upeu.edu.pe	Autor		
• Gabriela García Castillo	azallagarcia@upeu.edu.pe	Autor		
• Hugo Fernández	hugofo@upeu.edu.pe	Autor		
• Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez	ili@upeu.edu.pe	Autor		
• Jackson Edgardo Pérez Carpio	jacksonperez@upeu.edu.pe	Autor		
• Juan J. Sorla	jesussorla@upeu.edu.pe	Autor		
• Orlando Poma	opoma@upeu.edu.pe	Autor		

Mejoras adicionales

Palabras clave *

Añada más información al envío. Pulse "Intro" después de cada término.

Fotocatálisis heterogénea × demanda química de oxígeno (DQO) × dióxido de titanio (TiO₂) × cinética ×
Langmuir-Hinshelwood ×

Heterogeneous photocatalysis × chemical oxygen demand (COD) × titanium dioxide (TiO₂) × kinetics ×
Langmuir-Hinshelwood ×

Enviar un artículo

1. Inicio 2. Cargar el envío 3. Introducir los metadatos 4. Confirmación 5. Sigüientes pasos

Envío completo

Gracias por su interés por publicar con Tecnología y ciencias del agua.

¿Y ahora qué?

La revista ha sido notificada acerca de su envío y se le enviará un correo electrónico de confirmación para sus registros. Cuando el editor haya revisado el envío, se contactará con usted.

Por ahora, usted puede:

- [Revisar este envío](#)
- [Crear un nuevo envío](#)
- [Volver al escritorio](#)

Enviar un artículo

1. Inicio 2. Cargar el envío 3. Introducir los metadatos 4. Confirmación 5. Sigüientes pasos

Se ha subido su envío y ya está listo para ser enviado. Puede volver atrás para revisar y ajustar la información que desee antes de continuar. Cuando esté listo haga clic en "Finalizar envío".

[Finalizar envío](#) [Cancelar](#)

[tca] Acuse de recibo de envío

Gracias por enviar el manuscrito "un Fotocatálisis heterogénea mediante Nanopartículas de TiO₂ para el tratamiento de aguas residuales de camal " a Tecnología y ciencias del agua para posible publicación.

Con nuestro sistema de gestión en línea podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial:

URL del manuscrito:

<https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/authorDashboard/submission/3944>

Nombre de usuario/a: opoma

Quedo a sus órdenes.

Helena Rivas López

ANEXOS 2. Copia de Resolución de inscripción del perfil del proyecto de tesis en formato del artículo aprobado por consejo de facultad correspondiente.



"AÑO DEL BICENTENARIO DEL PERÚ: 200 AÑOS DE INDEPENDENCIA"

RESOLUCIÓN N° 0001/A-2021/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña, 12 de enero de 2021

VISTO:

El expediente de **Cristhian Adan Ayala Vasquez y Gabriela Azalia Garcia Castillo**, identificados con Código Universitario N° 201210264 y 201510126 de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Cristhian Adan Ayala Vasquez y Gabriela Azalia Garcia Castillo**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado **Desarrollo de superficies fotoactivas mediante la aplicación de nano partículas de dióxido de titanio para la fotodegradación de dióxido de nitrógeno y la designación del Asesor**, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 12 de enero, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado **Desarrollo de superficies fotoactivas mediante la aplicación de nano partículas de dióxido de titanio para la fotodegradación de dióxido de nitrógeno y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar al Ing. Orlando Alan Poma Porras** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: Mg. Joel Hugo Fernandez Rojas y Mg. Iliana Del Carmen Gutierrez Rodriguez, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.



Regístrese, comuníquese y archívese.

Dra. María Vallejos Atalayade Cornejo
DECANA



Mg. Sergio Omar Valladares Castillo
SECRETARIO ACADÉMICO

- cc:
- Interesado
 - Asesor
 - Dirección General de Investigación
 - Archivo