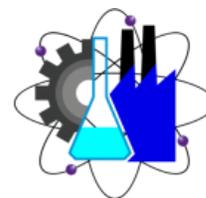




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
INGENIERÍA QUÍMICA

**Degradación de colorantes Azo con el proceso tipo fenton usando
nanotubos de CuO como catalizador**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

ERICKA LARISSA FLORES OLVERA

ASESOR

SUSANA SILVA MARTÍNEZ

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo y paciencia a la doctora susana por permitirme trabajar con ella. Debido a la pandemia COVID no fue posible completar dos de mis materias de la carrera en el laboratorio, así que la doctora susana fue clave para que yo aprendiera varias técnicas de laboratorio durante el proceso de mi tesis. Gracias infinitas.

Reconozco el esfuerzo que hacen mis padres y apoyo que me dan día a día.

INDICE

| | |
|---|----|
| CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES | 6 |
| 1.1 Introducción | 6 |
| 1.1.1 Contaminación del agua..... | 6 |
| 1.1.2 Contaminación de la industria textil | 7 |
| 1.1.3 Hipotesis | 7 |
| 1.1.4 Objetivos..... | 7 |
| 1.1.4.1 Objetivos específicos | 7 |
| 1.2 Antecedentes | 8 |
| 1.2.1 Procesos de oxidación avanzada | 8 |
| 1.2.2 Proceso de oxidación tipo Fenton heterogéneo | 8 |
| CAPITULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL..... | 11 |
| 2.1 Materiales y reactivo | 11 |
| 2.2 Fabricación del catalizador | 11 |
| 2.3 Síntesis de la oxidación de nanotubos | 12 |
| 2.4 Curva de calibración | 13 |
| 2.5 Degradación del agua..... | 14 |
| 2.6 Caracterización del catalizador..... | 14 |
| CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 15 |
| 3.1 Colorante Textil | 15 |
| 3.2 Caracterización del catalizador | 16 |
| 3.3 Evaluación de la eficiencia fotocatalítica de las bobinas de CuO | 18 |
| 3.3.1 Curva de calibración del AT-RP..... | 18 |
| 3.3.2 Calculo de la cantidad de H ₂ O ₂ requerida teóricamente | 20 |
| 3.3.3 Influencia de la cantidad de H ₂ O ₂ | 21 |
| 3.3.4 Influencia de la cantidad de catalizador..... | 25 |
| 3.3.5 Influencia del pH..... | 27 |
| 3.4 Mineralización del contaminante AT-RP | 31 |
| 3.5 Reutilización del catalizador..... | 31 |
| CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 33 |
| 4.1 Conclusiones | 33 |
| 4.2 Recomendaciones..... | 33 |
| REFERENCIAS | 34 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Bobinas de cobra..... | 12 |
| Figura 2.2 Síntesis de la oxidación de nanotubos..... | 13 |
| Figura 3.1 Estructuras moleculares de los colorantes azo que componen el colorante textil bajo estudio | 16 |
| Fig. 3.2 Imágenes SEM de alta resolución de nanotubos de CuO | 17 |
| Fig. 3.3 XRD de nanotubos de óxido de cobre..... | 18 |
| Fig. 3.4 Espectro de absorción del AT-RP en función de la longitud de onda a pH 3 | 19 |
| Fig. 3.5 Curva de calibración de absorbancia (a 428 nm) vs concentración del AT-RP en media ácido (pH 3). | 19 |
| Fig. 3.6 Remoción de color de 14 ppm de AT-RP en función de la concentración de H ₂ O ₂ | 23 |
| Fig. 3.7 Espectros de absorción del AT-RP en función del tiempo de degradación de 14 ppm de AT-RP y 2 piezas de catalizador a pH 3..... | 24 |
| Fig. 3.8 $\ln (C/C_0)$ en función del tiempo de la degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 2 piezas de catalizador a pH 3 usando diferentes concentraciones de H ₂ O ₂ (50% azul, 100% negro, 200% rojo y 300% verde). | 25 |
| Fig. 3.9 Remoción de color de 14 ppm de AT-RP en función de la cantidad de catalizador..... | 26 |
| Fig. 3.10 $\ln (C/C_0)$ en función del tiempo de la degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 200% H ₂ O ₂ a pH 3 usando diferentes cantidades de catalizador. | 27 |
| Fig. 3.11 Degradación de AT-RP en función del pH de la solución de 14 ppm de AT-RP. | 28 |
| Fig. 3.12 Espectros de absorción del AT-RP en función del tiempo de degradación de 14 ppm de AT-RP y 2 piezas de catalizador a pH 7..... | 29 |
| Fig. 3.13 $\ln (C/C_0)$ en función del tiempo de degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 200% de H ₂ O ₂ , 2 piezas de catalizador y diferentes valores de pH de la solución | 30 |
| Fig. 3.14 Reciclaje del catalizador en las condiciones siguientes: 14 ppm A5R6, 200% H ₂ O ₂ , 2 piezas de catalizador y pH neutro | 32 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1 Materiales, equipo y reactivos..... | 11 |
| Tabla 2.4 Absorbancia (a 428 nm) vs concentración del AT-RP en media ácido (pH 3)..... | 14 |
| Tabla 3.1 Cálculo de la cantidad de H ₂ O ₂ requerida teóricamente..... | 20 |
| Tabla 3.2 Cinética de pseudo primer orden de la degradación del contaminante textil AT-RP con el proceso tipo Fenton usando el catalizador CuO en las condiciones: | 30 |
| Tabla 3.3 Remoción de la DQO y COT de 14 ppm de AT-RP (COT inicial = 5.7, DQO inicial = 25.2) durante su degradación con el proceso tipo Fenton en diferentes condiciones. | 31 |

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En este capítulo se exponen los precedentes de la contaminación del agua por industrias textiles, los tratamientos de oxidación avanzada que incluye a los procesos Fenton y tipo Fenton heterogéneo.

1.1 Introducción

1.1.1 Contaminación del agua

El agua es un recurso natural indispensable que contribuye al desarrollo y supervivencia de todos los seres vivos del planeta, sin embargo, actualmente los problemas de contaminación de ríos, mares, océanos y lagos han incrementado y como consecuencia vemos la disminución del agua potable y grandes sequias.

Se dice que el agua está contaminada cuando agentes contaminantes químicos, físicos o biológicos repercuten negativamente en su calidad para el consumo humano o bienestar del ecosistema.

Los principales contaminantes involucrados en el deterioro del agua provienen de distintas actividades humanas; desechos industriales, agua con fertilizantes que provocan la acumulación de químicos como plomo, mercurio, nitratos y azufre que son difícil de tratar al igual que el uso de pesticidas en la agricultura,. Los gases industriales y contaminación vehicular provocan la acumulación de gases, los cuales mezclados en la atmósfera con el dióxido de carbono, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno provocan lluvias acidas. De esta forma se genera un ciclo del agua completamente contaminado que repercute a largo plazo., La excesiva tala de árboles contribuye a la aparición de sedimentos y bacterias bajo el suelo, las descargas de aguas residuales a diferentes cuerpos de agua (Benitez et al, 2021).

México ocupa el segundo lugar en aguas no tratadas. El caso más representativo se encuentra en el Valle del Mezquital en Hidalgo, donde se recibe un volumen promedio de 31 a 56.6 m³/s de aguas residuales sin tratar, y que son usadas para riego (Conagua, 2008).

1.1.2 Contaminación de la industria textil

La industria textil es una de las industrias que consumen grandes cantidades de agua. Las aguas residuales que generan tienen un gran número de contaminantes y en su mayoría colorantes diseñados para ser resistentes por lo cual son difíciles de tratar en plantas de tratamiento convencionales (Anjaneyulu *et al.*, 2005 y Días, *et al.*, 2007). Los efluentes generados se caracterizan por una elevada demanda química de oxígeno (DQO) debido a los compuestos orgánicos refractarios y demanda biológica de oxígeno (DBO) debido a la materia orgánica biodegradable, metales, elevada temperatura, alto contenido en color, pH inestable y sólidos en suspensión. La eficiencia de la remoción de DBO y DQO depende de la relación DBO/DQO el valor medio es de 0.35 dificultando la eliminación total del DQO, la biodegradación de colores textiles no debe ser menor a 0.6 para lograr una eliminación aceptable del efluente,. De esta manera es conveniente emplear procesos de oxidación avanzada o como pretratamiento biológico para la eliminación de materia orgánica refractaria de efluente textil (Salas, G. 2010).

1.1.3 Hipótesis

El uso de del proceso tipo Fenton podrá permitir el reuso del catalizador y un pH óptimo, esto para economizar el tratamiento de aguas a nivel industrial.

1.1.4 Objetivo

Evaluar la eficiencia fotocatalítica de las bobinas de nanotubos de óxido de cobre en el proceso tipo Fenton heterogéneo a través de la degradación de un colorante textil compuesto por dos colorantes azo.

1.1.4.1 Objetivos específicos

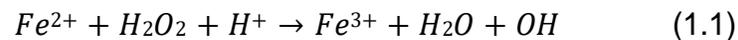
- Analizar el comportamiento del contaminante y su remoción respecto a la influencia de pH, concentración y cantidad de catalizador, cantidad de H_2O_2 y tiempo del proceso.
- Analizar el reuso el catalizador en el proceso tipo Fenton heterogéneo.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Procesos de oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada ayudan a eliminar materia orgánica recalcitrante, y en el caso de la industria textil los colorantes altamente resistentes. Se deben considerar valores óptimos de pH, concentración del contaminante, temperatura y agentes oxidantes que mejoran la reacción. Asimismo, se estudia la cinética de reacción con respecto a la concentración de radicales hidroxilos (OH) y la concentración de especies oxidadas (Arslan-Alaton, 2003).

Uno de los tratamientos de oxidación avanzada más conocido es el proceso de oxidación Fenton, que consiste en la oxidación de contaminantes con una combinación de peróxido de hidrogeno y sulfato ferroso, denominado reactivo Fenton presente en la ecuación (1.1).



Las condiciones óptimas del reactivo Fenton son valores de pH ácido, presión atmosférica típica y una temperatura de 20°C a 40°C. Se puede alcanzar altas remociones de contaminantes orgánicos. El radical hidroxilo, que es el encargado de la oxidación, se forma por la descomposición catalítica del peróxido de hidrogeno en un medio ácido (Méndez Novelo et al, 2010).

Con alta eficiencia, el reactivo de Fenton como POA puede eliminar contaminantes de una variedad de fuentes. Sin embargo, debido a que opera en un ambiente ácido, es necesario ajustar el pH antes y después del tratamiento. El hierro restante en el efluente también necesita un tratamiento posterior porque el proceso produce lodos tóxicos. Los POA tienen una serie de inconvenientes, incluidos costos operativos relativamente altos en comparación con los tratamientos biológicos convencionales y el no poder reutilizar el catalizador (Méndez Novelo et al, 2010).

1.2.2 Proceso de oxidación tipo Fenton heterogéneo

Actualmente es crucial crear métodos simples de eliminación y degradación de contaminantes orgánicos. Se cree que una estrategia prometedora para resolver este problema es el Proceso de Oxidación Avanzada (POA), un método productivo,

económico y respetuoso con el medio ambiente.

La catálisis de Fenton es uno de los procesos más estudiados, al tener (Fe^{+} y Fe^{3+}) tiene condiciones de pH estrecho y precipitación significativa de hierro. El cobre ha despertado interés en la investigación para abordar estos problemas y la ventaja de no presentar toxicidad, bajo costo, adaptable a un amplio rango de pH y amplia disponibilidad. La catálisis tipo fenton desempeña un papel comparable al del hierro. Desarrollar catalizadores eficaces y de fácil reciclaje sigue siendo un enorme desafío (Su et al, 2019).

“Actualmente, han surgido varios catalizadores tipo Fenton a base de cobre, como Cu/carbono (Wang et al. 2017), $CuSO_4$ (Nguyen et al. 2013), $Cu_2(OH)PO_4$ (Zhan et al. 2010), $Cu_2(OH)_3NO_3$ (Zhan et al., 2011), Cu- $AlPO_4$ (Zhang et al. 2017) y CuO/Al_2O_3 (Pan et al. 2015)” (Su et al, 2019).

En la investigación de (Su et al, 2019) se desarrolló un catalizador tipo Fenton con una malla de nanotubos de CuO que crecen de una malla de Cu , con dos procesos que es grabado húmedo con hidróxido de sodio y persulfato de amonio y secado térmico. La morfología de las mallas resultantes se analizó con microscopia electrónica de barrido, la estructura cristalográfica y los componentes en la superficie con difracción de rayos X y espectro de fotoelectrones de rayos X. La parte experimental se estudió la degradación de tintes orgánicos como el azul de metileno, cristal violeta y rodamina 6G, los procesos se realizaron a temperatura ambiente. Se concluyó que funcionó en amplios rangos de pH de 2.1 a 12 y posterior a la catálisis tuvo una recuperación del catalizador relativamente fácil y simple, Así mismo, se observó que tiene una excelente actividad catalítica en las pruebas de reciclaje y se podría asegurar la degradación de contaminantes orgánicos con gran efectividad al igual que la degradación de cristal de violeta, azul de metileno y rodamina 6G.

La investigación de (Zhang et al.,2003) sintetiza películas de nanoestructura de una serie de materiales compuesto de cobre sobre láminas de cobre mediante reacción liquido-sólido en condiciones alcalinas y oxidativas a presión ambiente. Los materiales incluyen $Cu(OH)$, fibras, rollo, láminas de CuO y conjunto de varillas de $Cu(OH)_2CO_3$. Las películas se formaron por oxidación directa de cobre en $NaOH$ o $NaHCO_3$, con un oxidante $(NH_4)_2S_2O_8$. Se demostró que el método de preparación

de películas de compuestos de cobre con estructuras ultrafinas tuvo alto rendimiento, condiciones de reacción suaves y la capacidad de producir estos materiales como monocristales y en forma de matrices.

El uso del cobre para diferentes aplicaciones ha expuesto un gran interés. En (Chen et al., 2016) se desarrolló la nanoestructura de CuO sobre una rejilla de cobre grabado en húmedo y deposición hidrotermal, recubierto con nanolaminas porosas de MnO₂. Se mostro un rendimiento electroquímico prometedor cuando se ensambla como supercondensador asimétrico utilizando CuO@MnO₂ como electrodo positivo y grafeno activo como electrodo negativo en la rejilla de cobre.

Por último, en (Huang et al, 2013) es importante determinar la glucosa de una manera sensible, confiable y rentable. Lo que despierta un interés en nanomateriales electroactivos de alto rendimiento para construir sensores sin enzimas. Se tomara nanocables de CuO porosos independientes como material de detección modelo para ilustrar este punto, donde in situ se formó una matriz de nanocables de CuO 3D y una pila de nanocables de CuO inmovilizados con un aglutinante de polímero mediante caída convencional. Como conclusión de este artículo, se cree que la matriz de nanocables de CuO ofrece oportunidades para construir dispositivos electroquímicos flexibles de alta eficiencia con excelente estabilidad de rendimiento frente a la flexión mecánica.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este apartado se explicará el material, reactivos y equipo que se utilizó para seguir el proceso de fabricación del catalizador y su caracterización, la oxidación de los nanotubos, la curva de calibración al igual que la concentración que se utilizó en la degradación del agua.

2.1 Materiales y reactivo

| EQUIPO | MATERIALES |
|---------------------------------|--|
| Dos vasos precipitados 100mL | 3m cable de cobre calibre 14 |
| Un matraz de 50mL | Gancho para tejer |
| Balanza analítica | Flexómetro |
| Calentador y agitador magnético | Palillos de madera |
| Dos barras de agitación | Pinzas pela cable |
| Bureta | REACTIVOS |
| Micropipeta | Hidróxido de sodio (NaOH) |
| Mufla | Ácido sulfúrico H ₂ SO ₄ |
| Espectrofotómetro | Persulfato de amonio (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ |

Tabla 2.1 Materiales, equipo y reactivos

2.2 Fabricación del catalizador

El material del que está hecho el catalizador es de cobre. Se realizaron dos diferentes formas de catalizador, uno en bobina y el otro de red. Se llevó a cabo los siguientes pasos:

1. Retirar el aislante en los 3m de cable y cortarlos de 1m
2. Separar los hilos que conforman el alambre en cada metro de cable

3. Comenzar a enrollar 1m de alambre en el palillo de madera de forma espiral, para darle forma de bobina
4. Con un gancho para tejer y 1m de cable, se dio la forma de una red

Nota: Las bobinas y red de cobre pesaban 1g. De igual forma la red será identificada como bobina.



Figura 2.1 Bobinas de cobra

2.2.1 Limpieza del catalizador

Para quitar cualquier suciedad que pudiera interferir en el proceso de oxidación, se realizó la siguiente limpieza

1. Se preparo una solución de ácido sulfúrico H_2SO_4 a 2M en 100mL de agua.
2. En un vaso precipitado de 100ml se agregó 50ml de la solución de ácido sulfúrico y las bobinas se introdujeron durante 10min.
3. Pasando los 10 min en la solución de ácido se lavaron 3 veces con agua desionizada y una vez con acetona
4. Durante 2 h se dejó secar las bobinas al aire libre

2.3 Síntesis de la oxidación de nanotubos

Previamente limpias las bobinas se preparó la solución oxidante, con hidróxido de sodio (NaOH) a 10M y persulfato de amonio $(NH_4)_2S_2O_8$ a 0.18M, en un volumen total de 50mL. Se sumergieron en la solución por 20min, después se lavaron con

agua desionizada y se dejaron secar por un día. Se ingresaron a la mufla para una deshidratación durante 3 horas a 190°C con una velocidad de calentamiento de 2°C/min, finalizado el tiempo de secado los nanotubos de óxidos de cobres se obtuvieron de la malla de Cu (Su, Zen et al. 2019).



Figura 2.2 Síntesis de la oxidación de nanotubos

2.4 Curva de calibración

Para el proceso de degradación y la curva de calibración se utilizó el colorante azo: el colorante amarillo Tartrazine (amarillo ácido 23) y el colorante rojo Ponceau 4R (rojo ácido 18) en proporción desconocida. Se construyó una curva de calibración con las siguientes concentraciones y absorbancias que se muestran en la tabla 2.4

| Concentración (ppm) | Absorbancia (nm) |
|------------------------|---------------------|
| 0 | 0 |
| 2.40 | 0.098 |
| 4.80 | 0.176 |
| 7.20 | 0.287 |
| 9.60 | 0.373 |
| 12.00 | 0.466 |
| 14.40 | 0.575 |

| | |
|-------|-------|
| 19.20 | 0.760 |
| 24.00 | 0.963 |
| 28.80 | 1.146 |

Tabla 2.4 absorbanza (a 428 nm) vs concentración del AT-RP en media ácido (pH 3).

A partir de la curva de calibración se tomó las concentraciones indicadas para el proceso de degradación del agua. Los resultados se encuentran en el capítulo 3 en el apartado 3.3.1

2.5 Degradación del agua

Los factores que se tomaron en cuenta para la remoción total del contaminante fue la influencia de la cantidad del catalizador, influencia de pH, influencia de la cantidad de reutilización del catalizador y la remoción de DQO y COT. Para comenzar la remoción total del contaminante se tomó en cuenta diferentes parámetros con los cuales se fue variando, dependiendo los resultados, Estos son mostrados en el capítulo 3:

- Selección del pH 7, pH 3 y pH 12
- Concentración de 14ppm
- Cantidad de H_2O_2 de 50%, 100%, 200% y 300% del estequimétrico requerido
- Cantidad de catalizador 1g, 2g y 3g
- El tiempo del proceso es de 60min.

Se coloca en un vaso de precipitado de 25mL la solución con los parámetros correspondientes, al agregar el catalizador comienza a correr el temporizador. Se debe mencionar que el peróxido de hidrogeno se agrega 2 s antes de meter el catalizador.

2.6 Caracterización del catalizador

La morfología de CuO se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (microscopio JEOL JSM-6010LA). Las estructuras cristalinas se evaluaron en un difractómetro de rayos X (Bruker D2 PHASER, 2.^a generación) registrando los espectros dentro del rango 2θ de 20-70° con un ángulo de incidencia rasante de 0.5° (Chen et al. 2016; Huang et al. 2015).

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo reporta la síntesis de un catalizador de nanotubos de óxido de cobre inmovilizado en un sustrato de cobre en forma de bobina y su aplicación en la remediación de efluentes contaminados con colorantes textil empleando el proceso tipo Fenton heterogéneo. El uso de catalizadores inmovilizados en sustratos solidos en el proceso Fenton heterogéneo facilita su recuperación debido a que se evitan operaciones de centrifugado, filtrado y secado después del tratamiento, disminuyendo los costos asociados de recuperación o perdida del catalizador. La morfología del catalizador de nanotubos de óxido de cobre se obtuvo por microscopia electrónica de barrido y su estructura cristalina se confirmó por difracción de rayos X. La evaluación de la eficiencia fotocatalítica de las bobinas de nanotubos de óxido de cobre se llevó a cabo en el proceso tipo Fenton heterogéneo a través de la degradación de un colorante textil compuesto por dos colorantes azo. Se evaluó el efecto de la concentración inicial de H_2O_2 , cantidad de catalizador y el pH de la solución acuosa a temperatura ambiente (25°C).

3.1 Colorante Textil

El contaminante textil está compuesto por colorantes azo: el colorante amarillo Tartrazine (amarillo acido 23) y el colorante rojo Ponceau 4R (rojo acido 18) en proporción desconocida; El contaminante textil bajo estudio será denotado como AT-RP en lo sucesivo. Los colorantes ácidos presentan uno o más grupos sulfonato, como lo muestran las estructuras moleculares reportadas en la figura 3.1 (Merck, 2023).

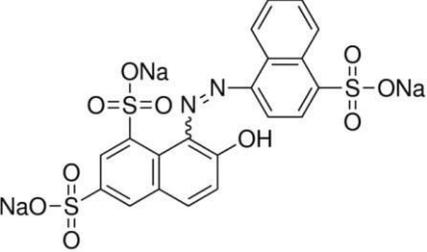
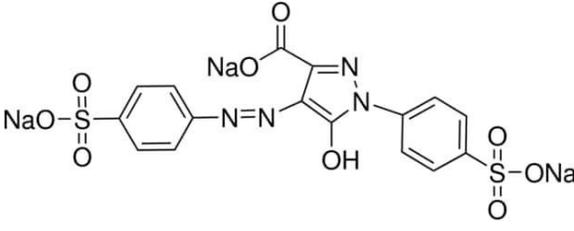
| Amarillo Tartrazine (amarillo ácido 23) | Rojo Ponceau 4R (rojo ácido 18) |
|---|--|
|  |  |
| $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$ (534.36 g/mol) | $C_{20}H_{11}N_2Na_3O_{10}S_3$ (604.47 g/mol) |

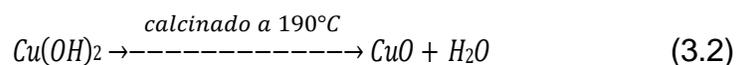
Figura 3.1 Estructuras moleculares de los colorantes azo que componen el colorante textil bajo estudio.

3.2 Caracterización del catalizador

Los nanotubos de óxido de cobre (CuO) se obtuvieron al sumergir piezas de 1 g de alambre de cobre enrollado en forma de bobina a la solución de oxidación para formar inicialmente nanotubos de Cu(OH)₂ en medio básico (Chen et al. 2016; Huang et al. 2015), ecuaciones (3.1) y (3.2):



Posteriormente, la deshidratación de los nanotubos de Cu(OH)₂ durante el tratamiento térmico a 190°C los transformo en nanotubos de CuO (Chen et al., 2016), de acuerdo con la siguiente ecuación:



La figura 3.2 muestra imágenes de los nanotubos de CuO obtenidas a diferentes magnificaciones por microscopía electrónica de barrido (SEM). Se observan nanotubos densos y uniformes crecidos sobre la superficie de la bobina de cobre en todas las direcciones. El diámetro interno de los nanotubos se encuentra entre 50 y 80 nm, aproximadamente.

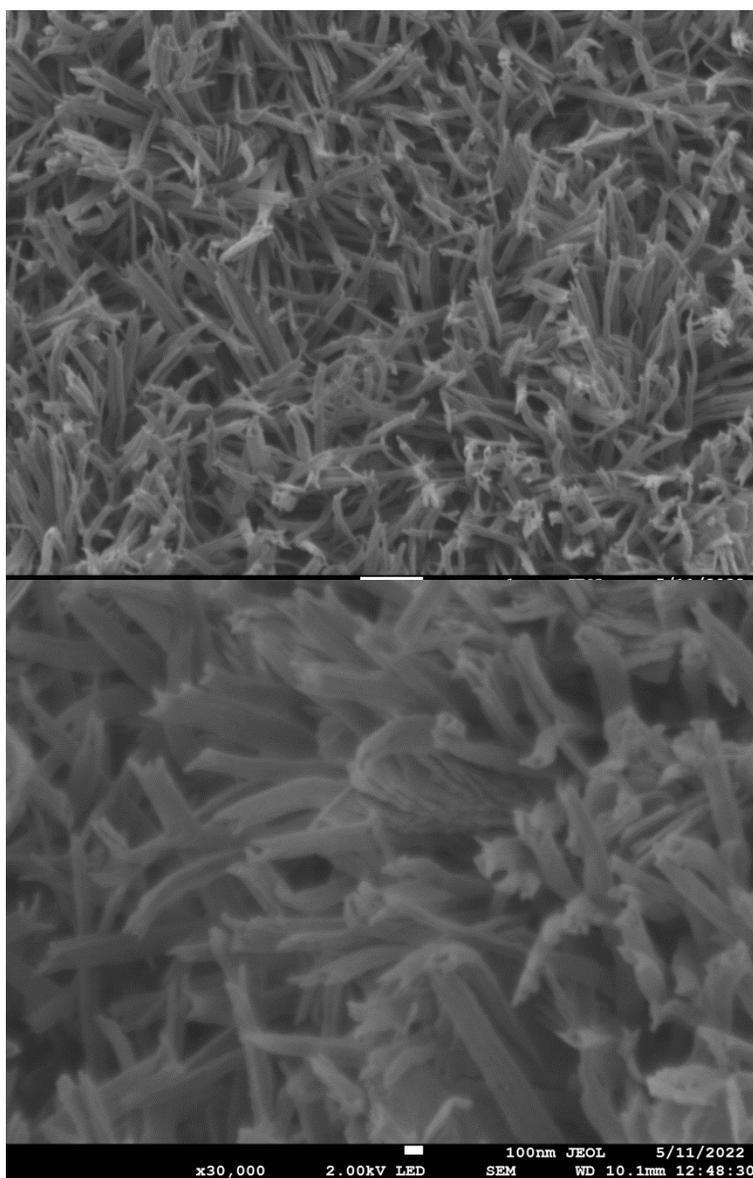


Fig. 3.2 Imágenes SEM de alta resolución de nanotubos de CuO.

La estructura cristalina de los nanotubos de óxido de cobre se confirmó por difracción de rayos X (XRD) mostrado en la Fig. 3.3. Los picos a 35° y 38.2° se atribuyen a las fases (-111) y (111) del CuO monoclinico, lo que confirma la conversión de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ a CuO debida a la deshidratación térmica. Los picos a 43.7° , 51° y 74.5° se atribuyen al sustrato de Cu no oxidado de las bobinas de cobre calcinadas (Huang et al., 2015; Chen et al., 2016).

Fig. 3.3 XRD de nanotubos de óxido de cobre

3.3 Evaluación de la eficiencia fotocatalítica de las bobinas de CuO

La evaluación de la eficiencia fotocatalítica de las bobinas de CuO se llevó a cabo en el proceso tipo Fenton heterogéneo a través de la degradación del contaminante textil AT-RP. La degradación del AT-RP se siguió con espectroscopia UV-Vis a través de mediciones de absorbancia en función del tiempo de degradación y mediciones del carbón orgánico total (COT) y la demanda química de oxígeno (DQO) para conocer el grado de mineralización del contaminante textil. Se evaluó la influencia de la concentración del H₂O₂, cantidad de catalizador y el pH de la solución en la eficiencia catalítica de los nanotubos de CuO.

3.3.1 Curva de calibración del AT-RP

Se construyó una curva de calibración para conocer la concentración del AT-RP inicial y a diferentes tiempos de degradación. Inicialmente, se registró el espectro de absorción del AT-RP en función de la longitud de onda para conocer la longitud de onda en donde se presenta la máxima absorbancia del contaminante, como lo reporta la figura 3.4. Posteriormente, se construyó una curva de calibración con la máxima absorbancia a 428 nm vs diferentes concentraciones de AT-RP, figura 3.5, con el fin de conocer la concentración inicial del AT-RP y a diferentes tiempos de su degradación catalítica en el proceso tipo Fenton heterogéneo.

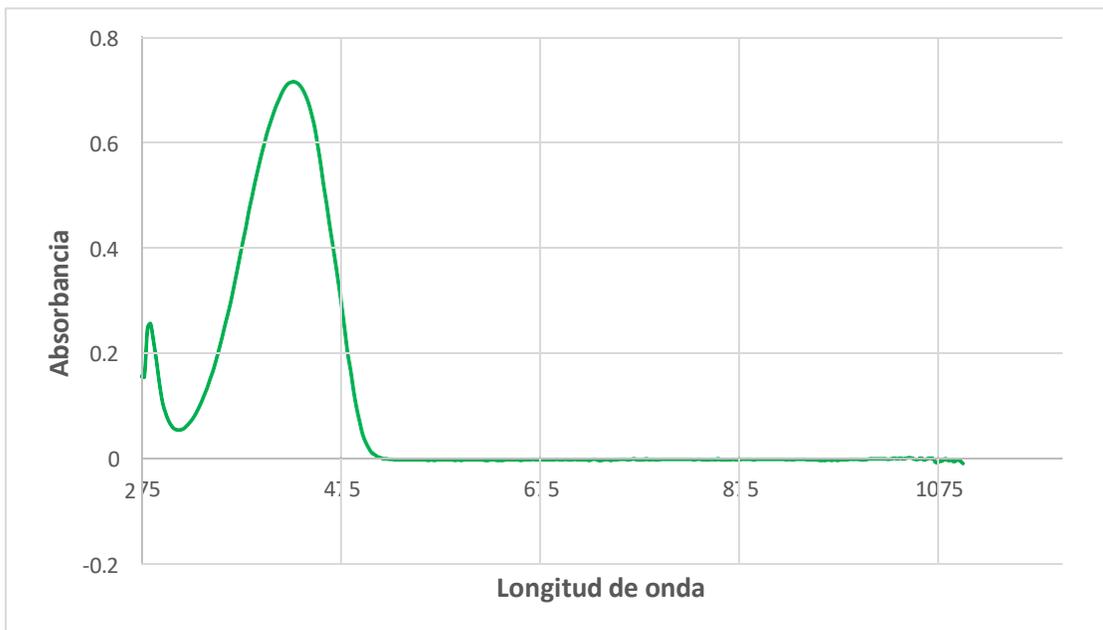


Fig. 3.4 Espectro de absorción del AT-RP en función de la longitud de onda a pH 3

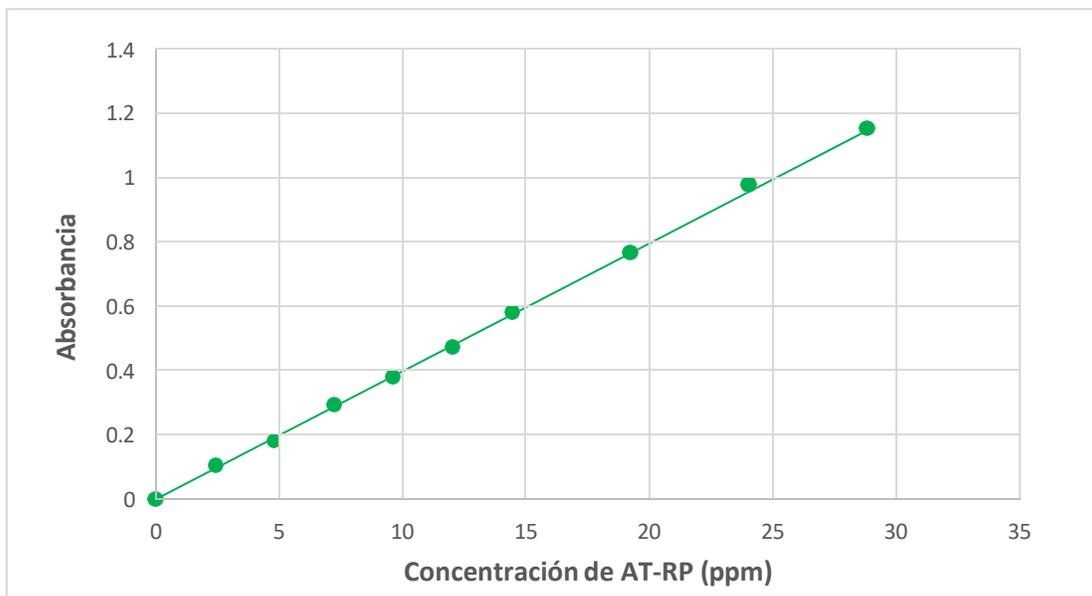


Fig. 3.5 Curva de calibración de absorbancia (a 428 nm) vs concentración del AT-RP en media ácido (pH 3).

La curva de calibración muestra un comportamiento lineal con un coeficiente de correlación lineal de $R^2 = 0.9996$ y se describe por medio de la ecuación de la línea recta:

$$\text{Absorbancia} = 3.97 \times 10^{-2} (\text{ppm AT} - \text{RP}) \quad (3.4)$$

De la cual es posible obtener la concentración del colorante bajo estudio a diferentes tiempos de degradación:

$$ppm \text{ AT} - \text{RP} = \frac{\text{Absorbancia}}{3.97 \times 10^{-2}} \quad (3.5)$$

El límite de detección (LD) (Şengül, 2016) de la curva de calibración es de 0.546 ppm de At-RP y se obtuvo mediante la ecuación (3.6):

$$LD = \frac{3(SE)}{b} \quad (3.6)$$

Donde $SE = 7.22 \times 10^{-3}$ y $b = 3.97 \times 10^{-2}$ corresponden a la desviación estándar de la respuesta y b es la pendiente de la curva de calibración, respectivamente. La desviación estándar de la respuesta se puede estimar por la desviación estándar de ya sea y-residuales, o y-intersecciones, de líneas de regresión.

3.3.2 Calculo de la cantidad de H₂O₂ requerida teóricamente

Para proceder con la degradación del contaminante orgánico en cuestión, fue necesario considerar la cantidad inicial del H₂O₂ requerida para degradarlo evitando un uso indebido o excesivo del oxidante. Así que se procedió a realizar el cálculo de la cantidad inicial del H₂O₂ considerando que los elementos que componen la formula molecular de cada colorante adquieren su oxidación total en su degradación, como lo muestran las reacciones (3.9) y (3.12), para el amarillo Tartrazine (AT) y Rojo Ponceau 4R (RP), respectivamente:

| Tabla 3.1 Calculo de la cantidad de H₂O₂ requerida teóricamente | |
|---|-------|
| AT: $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2 + 43H_2O - 100e^-$ $\rightarrow 16CO_2 + 4NO_3^- + 3Na^+ + 2SO_4^{2-} + 105H^+$ | (3.7) |
| $H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$ | (3.8) |
| $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2 + 52H_2O + 50H_2O_2$ $\rightarrow 16CO_2 + 4NO_3^- + 3Na^+ + 2SO_4^{2-} + 5H^+$ | (3.9) |

| | |
|---|--------|
| | |
| RP: $C_{20}H_{11}N_2Na_3O_{10}S_3 + 48H_2O - 101e^-$ $\rightarrow 20CO_2 + 2NO_3^- + 3Na^+ + 3SO_4^{2-} + 106H^+$ | (3.10) |
| $H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$ | (3.11) |
| $C_{20}H_{11}N_2Na_3O_{10}S_3 + 53H_2O + 51.5H_2O_2$ $\rightarrow 20CO_2 + 2NO_3^- + 3Na^+ + 3SO_4^{2-} + 5H^+$ | (3.12) |

Se puede observar que la cantidad de electrones que se debe retirar de cada colorante para lograr su completa oxidación es de $100e^-$ y $101e^-$ para el AT y RP, respectivamente. Lo que al reaccionar con el H_2O_2 se obtiene que la cantidad estequiométrica de 1 mol de colorante AT requiere 50 mol de H_2O_2 , mientras que 1 mol de colorante RP requiere 51 mol de H_2O_2 .

Debido a que la estequiometría es similar para ambos colorantes azo, se procedió a utilizar la relación estequiométrica como guía de que 1 mol del contaminante AT-RP requiere 51 mol de H_2O_2 para ser completamente mineralizado en el proceso tipo Fenton heterogéneo; esto implica haber considerado el peso molecular del colorante azo RP para saber la cantidad de H_2O_2 de según la concentración inicial de 14 ppm del AT-RP usadas respetando la estequiometría de AT-RP/ H_2O_2 teórica. De esta manera se contribuye a evitar el uso de un exceso y desperdicio de H_2O_2 .

3.3.3 Influencia de la cantidad de H_2O_2

La degradación del contaminante coloreado involucra la eliminación de color (generado por el cromóforo responsable de la intensa coloración del contaminante textil acuoso) y su mineralización. La remoción de color (%) se determinó con la ecuación (3.13) y la mineralización mediante el análisis del carbón orgánico total (COT) y la ecuación (3.14).

$$\text{Remoción de color (\%)} = \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) * 100 \quad (3.13)$$

$$\text{Mineralización (\%)} = \left(1 - \frac{COT_t}{COT_0}\right) * 100 \quad (3.14)$$

El grado de la extensión de la degradación se observó también con la medición de la demanda química de oxígeno (DQO), ecuación (3.15)

$$\text{Remoción de DQO (\%)} = \left(1 - \frac{DQO_t}{DQO_0}\right) * 100 \quad (3.15)$$

Donde C_0 , COT_0 y DQO_0 son las concentraciones iniciales de AT-RP, COT y DQO, respectivamente: mientras que C_t , COT_t y DQO_t corresponden a las concentraciones de AT-RP, COT y DQO_t al tiempo t , respectivamente.

El proceso tipo Fenton heterogéneo se llevó a cabo usando diferentes cantidades de H_2O_2 :

- a) 100% de H_2O_2 y 14 ppm AT-RP corresponde a la estequiometría dada por la ecuación (3.12), dada para el colorante azo RP (14 ppm equivale a 0.017×10^{-3} mol/L), lo que equivale a una concentración inicial de $H_2O_2 = 0.85 \times 10^{-3}$ mol/L
- b) 200% de H_2O_2 y 14 ppm AT-RP corresponde a la estequiometría dada por la ecuación (3.12), lo que equivale a una concentración inicial de $H_2O_2 = 1.70 \times 10^{-3}$ mol/L
- c) 300% de H_2O_2 y 14 ppm AT-RP corresponde a la estequiometría dada por la ecuación (3.12), lo que equivale a una concentración inicial de $H_2O_2 = 2.55 \times 10^{-3}$ mol/L

De esta manera, se pretendió encontrar la concentración óptima experimental del H_2O_2 en la degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 2 piezas de catalizador a pH 3, como lo muestra la figura 3.6. Esta figura indica que a medida que la concentración inicial de H_2O_2 aumenta (del 50 al 200%), la disminución de la concentración del contaminante se incrementa; sin embargo, cuando se tiene un exceso de H_2O_2 (300%) la degradación del contaminante disminuye ligeramente hasta los 45 minutos de oxidación, logrando prácticamente la remoción total de color a los 60 minutos de reacción en 200 y 300% de H_2O_2 . La

remoción de color se atribuye a la reacción catalítica del CuO con el H₂O₂ en el

proceso tipo Fenton. El CuO promovió la descomposición catalítica del H₂O₂ generando los radicales hidroxilos (OH•) altamente oxidantes (Wang et al., 2015, Su et al., 2019). Un exceso de H₂O₂ mayor a 200% compite con los radicales OH• disminuyendo su disponibilidad para degradar a las moléculas del contaminante, como lo indican las reacciones (3.16) a (3.18) (Zhao et al., 2004):

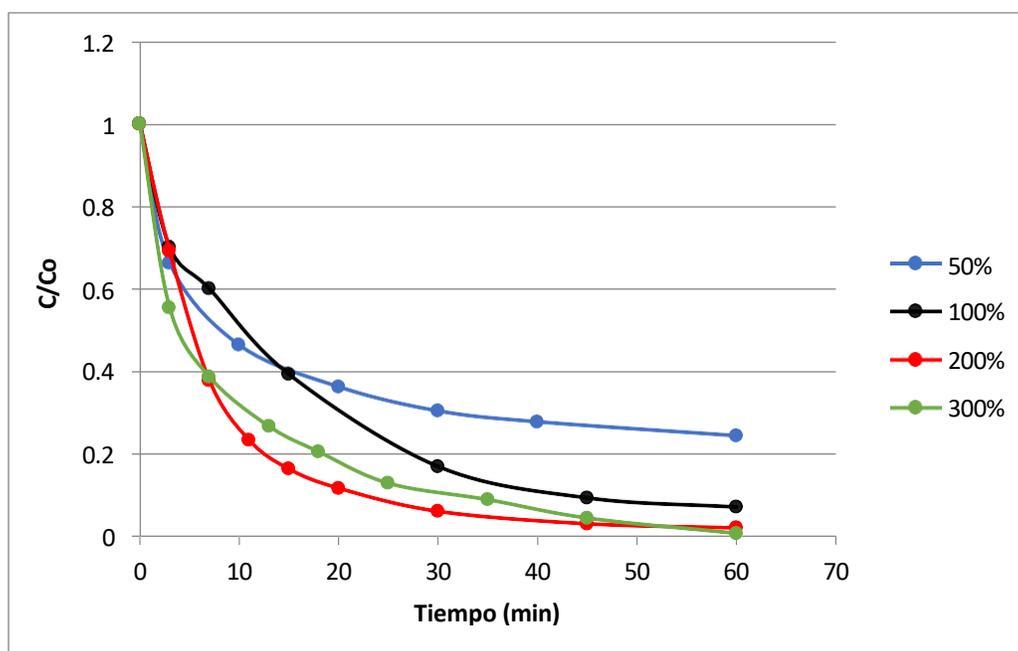
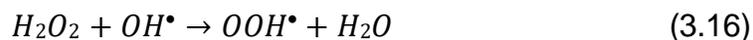


Fig. 3.6 Remoción de color de 14 ppm de AT-RP en función de la concentración de H₂O₂

En la figura 3.7 se muestran espectros de absorbancia de AT-RP en función del tiempo de degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 100% H₂O₂ a pH 3. Se observa que las curvas disminuyen a medida que se incrementa el tiempo de degradación. Esto se atribuye a la disminución de la intensa coloración del contaminante textil acuoso debida al cambio estructural de la molécula del contaminante y se manifiesta como la destrucción del cromóforo responsable de la

intensa coloración del contaminante. Esta figura muestra que el espectro

correspondiente a la muestra sin tratar no contiene el pico de absorbancia a 806 nm. Dicho pico aparece después de 13 min de tratamiento y corresponde a la absorbancia característica del Cu^{2+} a esa longitud de onda (Silva y Roy, 2013). Este comportamiento indica inestabilidad del catalizador a pH ácido debido a que el catalizador de CuO parece disolverse durante el tratamiento formando iones Cu^{2+} que absorben a 806 nm (posiblemente se disuelve también el sustrato de Cu). Asimismo, se observa la aparición de un pico a 365 nm adicional al pico de 428 nm, implicando la posibilidad de la formación de una nueva especie que absorbe a 365 nm.

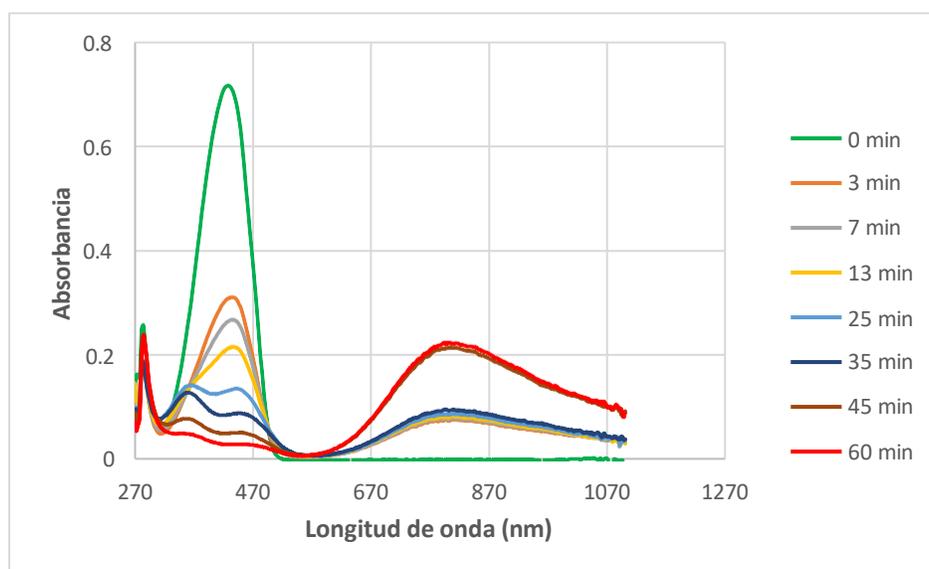


Fig. 3.7 Espectros de absorción del AT-RP en función del tiempo de degradación de 14 ppm de AT-RP y 2 piezas de catalizador a pH 3.

La degradación del contaminante textil muestra un comportamiento lineal indicando que el proceso de oxidación corresponde a una reacción de pseudo-primer orden como lo muestra la figura 3.8 y la tabla 3.2. La constante de reacción de pseudo-primer orden (k) de la degradación catalítica de AT-RP se obtuvo mediante el gráfico de $\ln(C_t/C_0)$ en función de t de acuerdo con la siguiente ecuación (3.19).

$$C_t = C_0 \exp(-kt) \quad (3.19)$$

Donde C_o y C_t son las concentraciones correspondientes al inicio y al tiempo t durante la degradación de AT-RP, respectivamente.

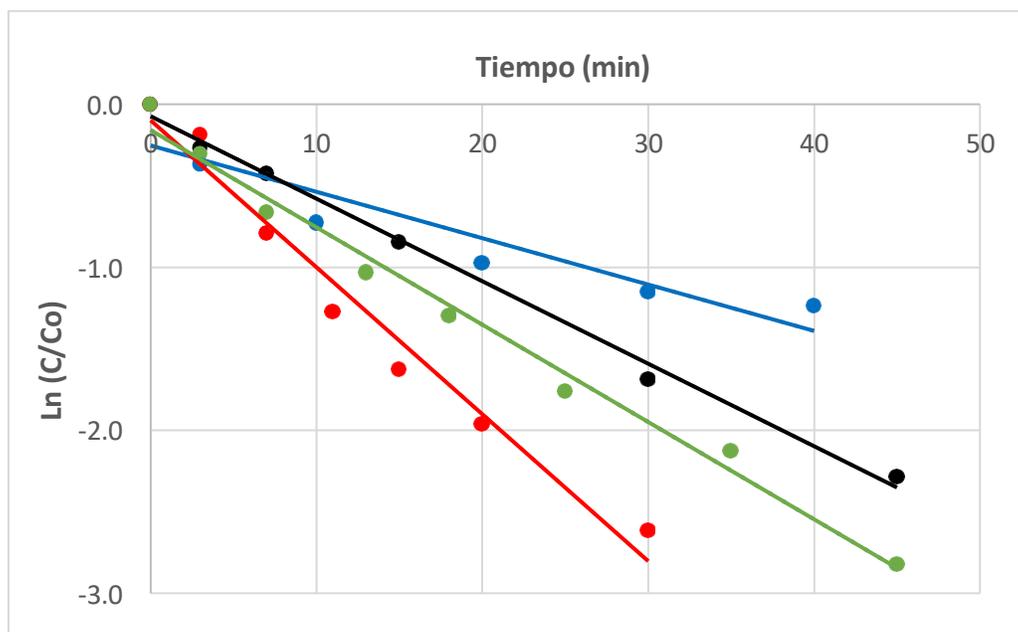


Fig. 3.8 $\ln(C/C_o)$ en función del tiempo de la degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 2 piezas de catalizador a pH 3 usando diferentes concentraciones de H_2O_2 (50% azul, 100% negro, 200% rojo y 300% verde).

La tabla 3.2 muestra que se obtuvo una k de 0.0901 min^{-1} con un coeficiente de correlación lineal $R^2 = 0.9724$ usando la concentración de 200% H_2O_2 considerada como óptima a pH 3 y 2 piezas de catalizador CuO para degradar 14 ppm de AT-RP.

3.3.4 Influencia de la cantidad de catalizador

La figura 3.9 reporta la remoción de color de 14 ppm de AT-RP en función del número de piezas de cantidad de catalizador. La disminución de la concentración normalizada (C/C_o) se incrementa a medida que el número de piezas aumenta de 1 a 3 obteniéndose una remoción de color del 97% con 2 y 3 piezas de CuO. Esto se atribuye a que mayor cantidad de nanotubos del catalizador de CuO se promueve una mayor descomposición catalítica del H_2O_2 generando mayor cantidad de OH^\bullet impactando favorablemente en una mayor degradación del AT-RP.

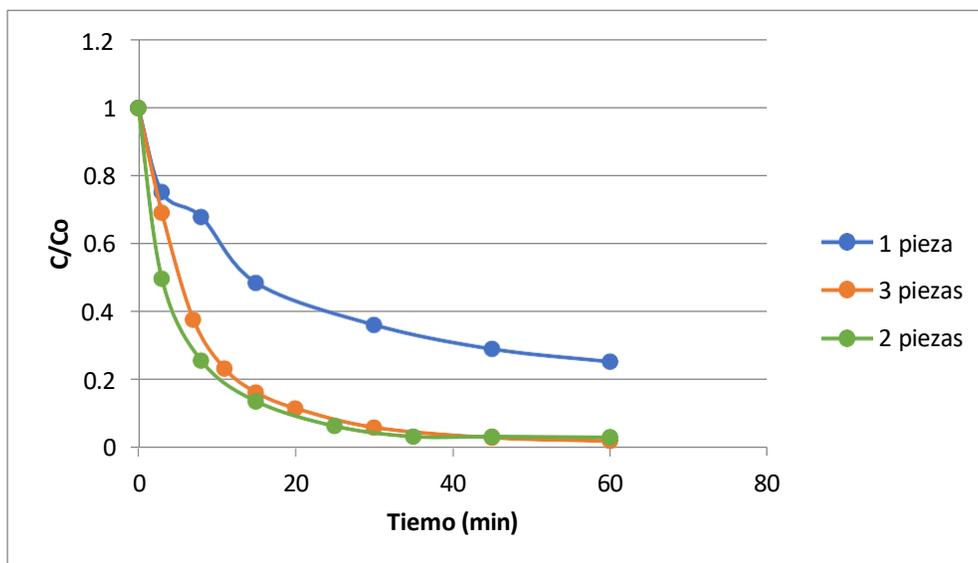


Fig. 3.9 Remoción de color de 14 ppm de AT-RP en función de la cantidad de catalizador

La cantidad de 2 piezas de sustrato de cobre que soportan al CuO es considerada como óptima. El uso del catalizador CuO inmovilizado en el sustrato de cobre facilita el proceso de recuperación después de la oxidación en el proceso tipo Fenton heterogéneo.

La degradación del contaminante textil usando mayor cantidad de catalizador mantiene el comportamiento lineal en el proceso de oxidación y corresponde a una reacción de pseudo-primer orden como lo muestra la figura 3.10 y la tabla 3.2. Se obtuvo una k de 0.0901 min^{-1} ($R^2 = 0.9724$) y de 0.0894 min^{-1} ($R^2 = 0.9749$) con 2 y 3 piezas de catalizador, respectivamente. Con base en esto, se consideraron como óptimo 2 ó 3 piezas de catalizador de CuO para degradar 14 ppm de AT-RP usando la concentración de 200% H_2O_2 a pH 3.

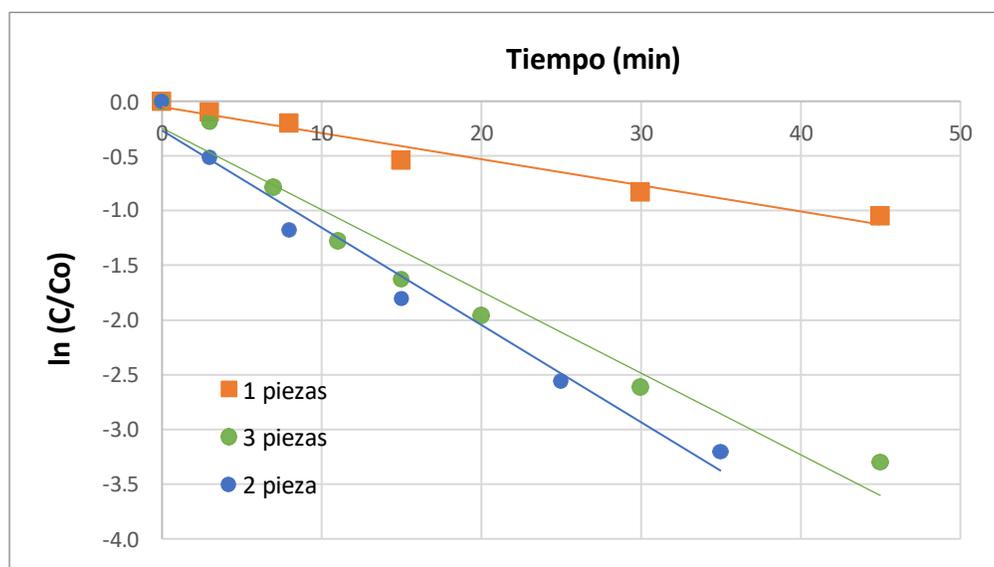


Fig. 3.10 $\ln (C/C_0)$ en función del tiempo de la degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 200% H_2O_2 a pH 3 usando diferentes cantidades de catalizador.

3.3.5 Influencia del pH

El pH de la solución contaminante es un parámetro importante en las reacciones del proceso Fenton debido a que el pH controla la velocidad de producción de los OH^\bullet , puede modificar la carga superficial del catalizador y también el comportamiento del contaminante (en caso de presentar propiedades ácido/base) durante su oxidación en el proceso Fenton. La Fig. 3.11 muestra el comportamiento de la disminución de la concentración normalizada (remoción del color) en función del tiempo de degradación del proceso. El pH más favorable de degradación es 3 hasta 30 min de oxidación (83% de remoción de color), y posteriormente, a los 60 min se logra el 97% de remoción de color. La degradación en medio ácido muestra un comportamiento similar a la degradación a pH 3, obteniendo también el 97% de decoloración a pH 7. Mientras que en la solución básica (pH 12) el tratamiento disminuyó el 10% de la concentración inicial del AT-RP aproximadamente. La baja eficiencia de degradación de AT-RP a pH 12 se atribuye a la disminución del potencial de oxidación los OH^\bullet en medio básico (el potencial de oxidación del par redox OH^\bullet/H_2O es 2.59 V a pH 0, mientras que el del OH^\bullet/HO^- es 1.64 V a pH 14 (Bossman et al., 1998)).

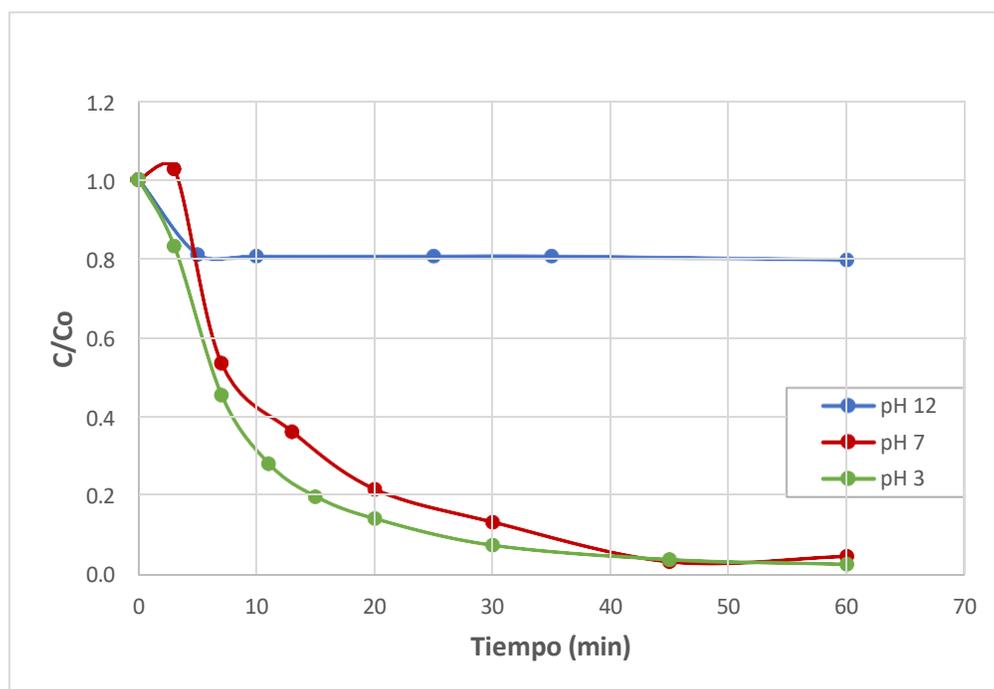


Fig. 3.11 Degradación de AT-RP en función del pH de la solución de 14 ppm de AT-RP.

Es interesante observar que en medio neutro se favorece la degradación de AT-RP sin comprometer la estabilidad del catalizador (como lo muestra la Fig. 3.12). La Fig. 3.12 muestra espectros de absorbancia de AT-RP en función del tiempo de degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 200% H₂O₂ a pH 7. Se observa que las curvas disminuyen a medida que se incrementa el tiempo de degradación con un desplazamiento del pico de máxima absorbancia hacia la derecha (a $\lambda > 428$ nm). Asimismo, ningún espectro muestra el pico de absorbancia a 806 nm correspondiente a la absorbancia característica del Cu²⁺ a esa longitud de onda (Silva y Roy, 2013). Estos espectros muestran que el catalizador es estable durante la degradación de AT-RP en medio neutro.

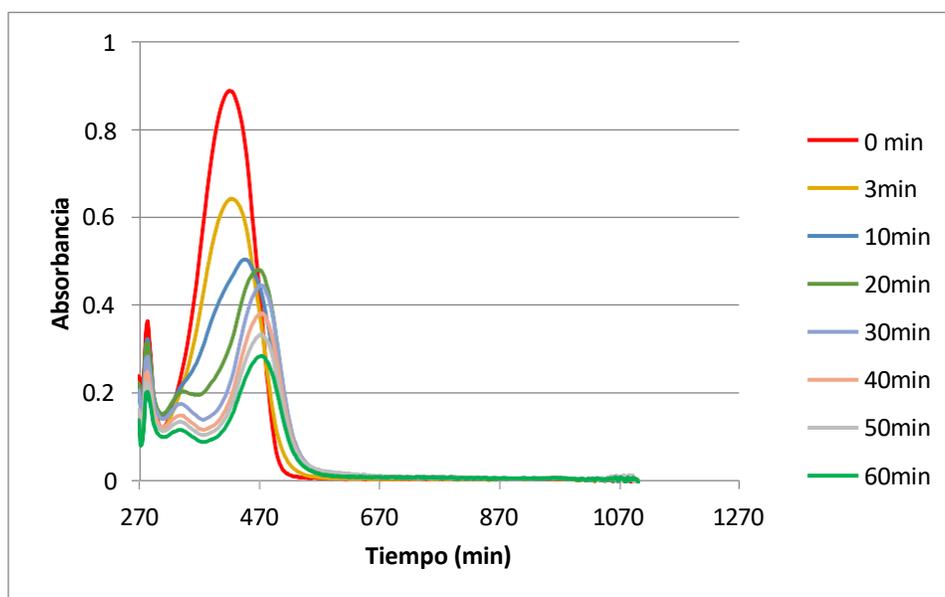


Fig. 3.12 Espectros de absorción del AT-RP en función del tiempo de degradación de 14 ppm de AT-RP y 2 piezas de catalizador a pH 7.

Adicionalmente, la degradación del contaminante textil a pH 7 mantiene el comportamiento lineal en el proceso de oxidación correspondiendo a una reacción de pseudo-primer orden como lo muestra la figura 3.13 y la tabla 3.1. Se obtuvo una k de 0.0901 min^{-1} ($R^2 = 0.9643$) y de 0.0763 min^{-1} ($R^2 = 0.9862$) a pH 3 y 7, respectivamente. Con base en esto, se consideró el pH 7 como valor óptimo para degradar 14 ppm de AT-RP usando la concentración de 200% H_2O_2 y 2 piezas de catalizador de CuO.

La tabla 3.2 condensa los valores de las constantes de reacción obtenidas en diferentes condiciones de degradación del AT-RP. Se han resaltado (en negrillas) las condiciones óptimas de degradación del contaminante textil con la finalidad de que este estudio pueda servir de base para degradar colorantes azo usando el catalizador de CuO.

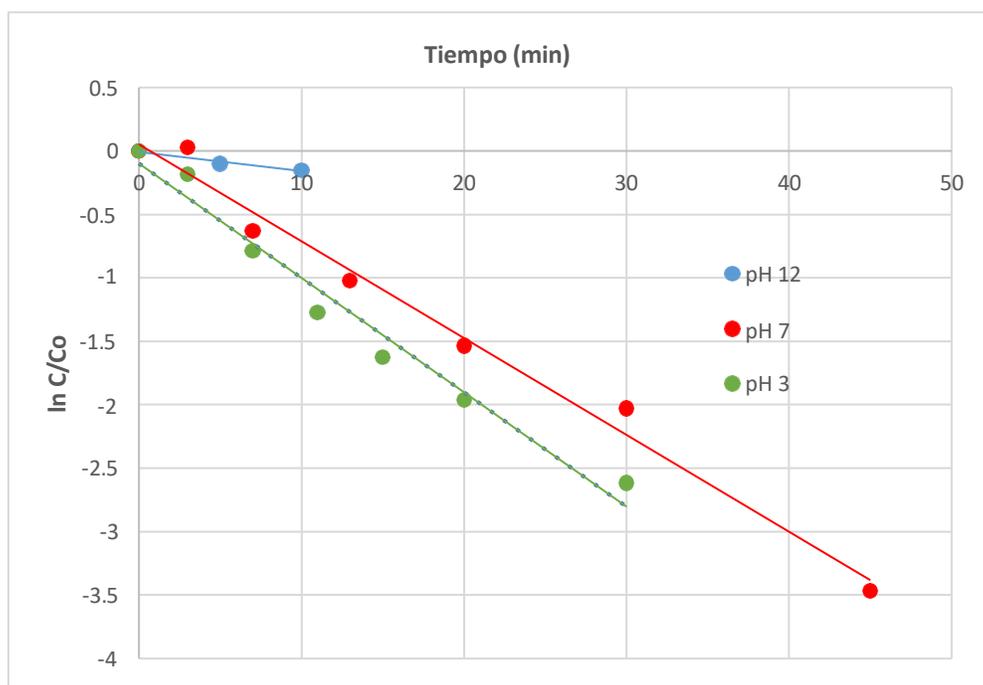


Fig. 3.13 $\ln (C/C_0)$ en función del tiempo de degradación de 14 ppm de AT-RP en presencia de 200% de H_2O_2 , 2 piezas de catalizador y diferentes valores de pH de la solución.

Tabla 3.2 Cinética de pseudo primer orden de la degradación del contaminante textil AT-RP con el proceso tipo Fenton usando el catalizador CuO en las condiciones:

| Parámetro | Cantidad | k (min ⁻¹) | R ² |
|--|------------|------------------------|----------------|
| % H_2O_2 variable + 2 piezas de catalizador + 14 ppm AT-RP a pH 3 | 50 | 0.0226 | 0.9185 |
| | 100 | 0.0506 | 0.9947 |
| | 200 | 0.0901 | 0.9724 |
| | 300 | 0.0597 | 0.9885 |
| Cantidad catalizador variable (número de piezas) + 200% H_2O_2 + 14 ppm AT-RP a pH 3 | 1 | 0.0239 | 0.9651 |
| | 2 | 0.0901 | 0.9724 |
| | 3 | 0.0894 | 0.9749 |
| pH variable + 200% H_2O_2 + 2 piezas de catalizador + 14 ppm AT-RP | 3 | 0.0901 | 0.9643 |
| | 7 | 0.0763 | 0.9862 |
| | 12 | 0.0150 | 0.9724 |

3.4 Mineralización del contaminante AT-RP

La mineralización consiste en transformar al contaminante orgánico en sus componentes inorgánicos tales como CO₂, ácidos minerales y H₂O, tal como lo indican las reacciones químicas (3.9) y (3.12) correspondientes a la mineralización de los componentes del contaminante textil AT-RP. La mineralización se siguió a través de mediciones de COT de muestras acuosas de colorante sometidas al tratamiento con el proceso tipo Fenton heterogéneo. La tabla 3. reporta la remoción del COT y también reporta el grado de la extensión de degradación del contaminante a través de la DQO.

Esta tabla muestra que se obtuvo una mayor extensión de oxidación (DQO) y una mayor mineralización (55%) de 14 ppm de AT-RP a pH 3 con tres piezas de catalizador y 200% de H₂O₂. Esto se atribuye a que existe mayor disponibilidad de OH• debido a que una mayor cantidad de nanotubos del catalizador de CuO promueve una mayor descomposición catalítica del H₂O₂, impactando favorablemente en una mayor degradación del AT-RP.

| <i>Tabla 3.3 Remoción de la DQO y COT de 14 ppm de AT-RP (COT inicial = 5.7, DQO inicial = 25.2) durante su degradación con el proceso tipo Fenton en diferentes condiciones.</i> | | | |
|---|--|----------------------------|----------------------------|
| Condiciones | Número de piezas de catalizador | Remoción de COT (%) | Remoción de DQO (%) |
| 200% de H ₂ O ₂ a pH 3 | 2 | 36.4 | 38.9 |
| | 3 | 55.0 | 66.7 |
| 100% de H ₂ O ₂ a pH 7 | 2 | 6.2 | 40.5 |

3.5 Reutilización del catalizador

El reúso del catalizador en el proceso tipo Fenton heterogéneo contribuye a disminuir los costos asociados al tratamiento. La Fig. 3.14 reporta los resultados de tres ciclos de degradación del contaminante textil en medio neutro en presencia de

200% de H_2O_2 . La degradación se llevó a cabo usando el mismo catalizador de CuO (2 piezas) en tres degradaciones consecutivas de 14 ppm de AT-RP como concentración inicial de contaminante en cada degradación. El uso del catalizador CuO inmovilizado en el sustrato de cobre facilitó el proceso de su recuperación después de cada ciclo de oxidación. Después de cada ciclo, el catalizador usado se retiró de la solución tratada, se lavó con agua destilada y se volvió a usar en dos experimentos similares sucesivamente. Como se aprecia en la figura 3.14, el catalizador disminuye su eficiencia catalítica en un 20% en cada degradación sucesiva del contaminante textil, mostrando una degradación (decoloración) del 60% en el tercer ciclo, esto implica poca estabilidad del catalizador. Sin embargo, no hay evidencia de que el cobre se estuviera disolviendo durante el proceso de degradación debido a que no se observó el pico de absorbancia a 806 nm, obteniéndose espectros similares a los reportados en la Fig. 3.12 a pH 7.

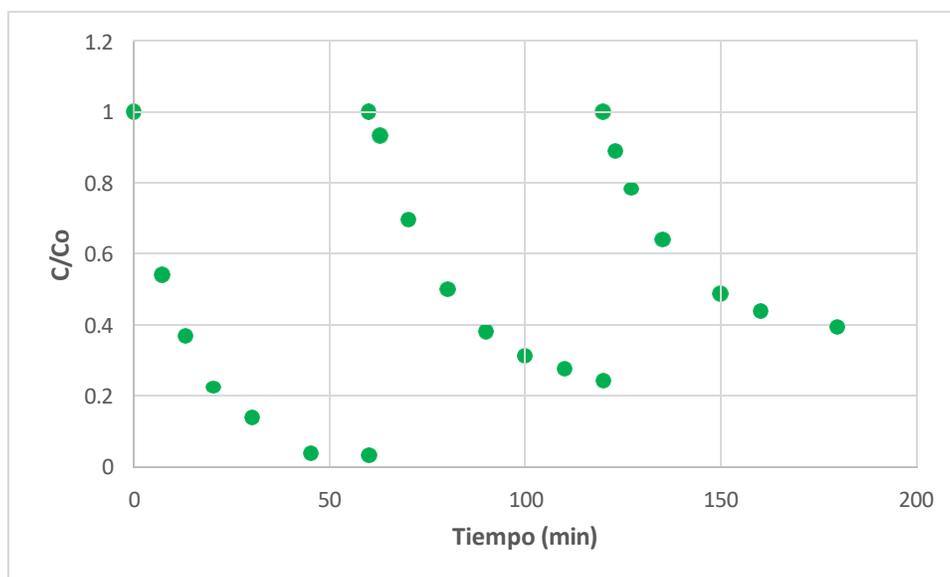


Fig. 3.14 Reciclaje del catalizador en las condiciones siguientes: 14 ppm A5R6, 200% H_2O_2 , 2 piezas de catalizador y pH neutro.

CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La degradación de AT-RP con el proceso tipo Fenton heterogéneo esta influenciada por el pH de la solución, la cantidad inicial de H₂O₂ y la cantidad de catalizador. Las condiciones óptimas de degradación de 14 ppm de AT-RP acuoso fueron: medio ácido (pH 3), una concentración inicial de H₂O₂ de 1.7x10⁻³ mol/L y 3 piezas de catalizador (soportadas c/u en sustrato de cobre de 1.0 g) lográndose una mineralización del 55% y una remoción de DQO del 66.7% en 60 min en estas condiciones. Finalmente, se logró reciclar el catalizador tres veces consecutivamente logrando el 97%, 76% y 61% de remoción de color en el primer, segundo y tercer uso del catalizador, respectivamente.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda aumentar la cantidad del catalizador de CuO usado en la experimentación de degradación del contaminante textil con el fin de incrementar la mineralización del contaminante textil. También se recomienda mejorar la síntesis del catalizador CuO y explorar su uso en la degradación de contaminantes textiles (o emergentes) mediante el proceso tipo Fenton en medio acuoso neutro con el fin de contar con un catalizador que disminuya el consumo de reactivos y sea compatible con el medio ambiente.

REFERENCIAS

Bossmann, S.H., Oliveros, E., Göb, S., Siegwart, S., Dahlen, E.P., Payawan, L. Jr., Straub, M., Wörner, M., Braun, A.M., 1998. New evidence against hydroxyl radicals as reactive intermediates in the thermal and photochemically enhanced Fenton reactions, *J. Phys. Chem. A.* 102, 5542–5550.

Chen, H., Zhou, M., Wang, T., Li, F., Zhang, Y.X., 2016. Construction of unique cupric oxide-manganese dioxide core-shell arrays on a copper grid for high-performance supercapacitors. *J. Mater. Chem. A* 4, 10786-10793.

Huang, J., Zhu, Y., Yang, X., Chen, W., Zhou, Y., Li, C., 2015. Flexible 3D porous CuO nano-wire arrays for enzymeless glucose sensing: in situ engineered versus ex situ piled. *Nanoscale* 7, 559-569.

Merck, 2013. <https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/product/sial/18137>;
<https://www.sigmaaldrich.com/MX/es/search/5-1934-21-0?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=51934-21-0&type=product> (Consultado en enero 2023).

CONAGUA. Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco de Tula, Estado de Hidalgo. Memoria del proyecto. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2008, 97 pp.

Anjaneyulu, Y., Sreedhara Chary, N., & Samuel Suman Raj, D. (2005). Decolourization of industrial effluents—available methods and emerging technologies—a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4(4), 245-273.

Salas, G. (2010). Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 13(1), 30-38.

Arslan-Alaton I. (2003). A review of the effects of dye-assisting chemicals on advanced oxidation of reactive dyes in wastewater. *Coloration Technology*, 119: 345-353.

Méndez Novelo, R. I., García Reyes, R. B., Castillo Borges, E. R., & Sauri Riancho, M. R. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. *Ingeniería e investigación*, 30(1), 80-85.

Silva-Martínez, S., Roy, S., 2013. Copper recovery from tin stripping solution: Galvanostatic deposition in a batch-recycle system, *Separation and Purification Technology*. 118, 6-12.

Su, Z., Jing Li, Dandan Zhang, Pin Ye, Heping Li, Youwei Yan, 2019. Novel flexible Fenton-like catalyst: Unique CuO nanowires arrays on copper mesh with high efficiency across a wide pH range, *Science of The Total Environment*, 647, 587-596.

Wang, Y., Zhao, H., Zhao, G. 2015. Iron-Copper Bimetallic Nanoparticles Embedded within Ordered Mesoporous Carbon as Effective and Stable Heterogeneous Fenton Catalyst for the Degradation of Organic Contaminants. *Appl. Catal. B* 164, 396–406.

Zhao, X.-K., Yang, G.-P., Wang, Y.-J., Gao, X.-C., 2004. Photochemical degradation of dimethyl phthalate by Fenton reagent, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 161, 215–220.

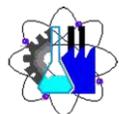
Zhang, W., Wen, X., & Yang, S. (2003). Controlled reactions on a copper surface: synthesis and characterization of nanostructured copper compound films. *Inorganic chemistry*, 42(16), 5005-5014.

Şengül, Ü., 2016. Comparing determination methods of detection and quantification limits for aflatoxin analysis in hazelnut, *J. Food. Drug Anal.* 24, 56-62.

Benítez, E. M. L., Verdecia, G. M., & Castell, M. A. P. (2021). Escasez y contaminación del agua, realidades del siglo XXI. 16 de abril, 60(279), 854.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMA T4
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 8 de noviembre de 2023

DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
DR. ALBERTO ALVAREZ GALLEGOS
DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ
DRA. CARMEN HENEFF GARCÍA ESCOBAR
DRA. FERNANDA MORALES GUZMÁN
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** de la TESIS titulada:

Degradación de colorantes Azo con el proceso tipo fenton usando nanotubos de CuO como catalizador

Dirigida por la **DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ**

Que presenta (el) o (la) **C. ERICKA LARISSA FLORES OLVERA**, del programa educativo de la **LICENCIATURA en INGENIERÍA QUÍMICA**.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
Encargada de despacho de la dirección de la FCQel

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQel
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

| VOTO | NOMBRE |
|-------------|--|
| Aprobatorio | DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ |
| Aprobatorio | DR. ALBERTO ALVAREZ GALLEGOS |
| Aprobatorio | DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ |
| Aprobatorio | DRA. CARMEN HENEFF GARCÍA ESCOBAR |
| Aprobatorio | DRA. FERNANDA MORALES GUZMÁN |

Se anexan firmas electrónicas de cada revisor, en las cuales se incluye la fecha y hora que se ha emitido el voto aprobatorio.

AGF/mg

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2023-11-08 17:51:09 | Firmante

MEwn2eNVJNYs5DV5oqejx1b3LNk011/U8vrTYBxQKopfutCxVQcU/VCQJ4hoR+4+PeTFLkFVSLzb9V7CobgVlglplujQK4qcLCAVjZk2d8JSSdnofCicH0NErw5DJBIZH8dGM9C1B8DLu25FqCvxgSaAc0+hoyiDGB0Bi3YV8Qz1j5wABoDeoaSY6DSsVivj6vUeHYuFc7PuRc9DTLOwTU7rYcfghBZFa6TyKS9qyAO7w55ElpB1c55d84+HSdYCPeCfu3kQLFFwZARhAU8wi76bOZsu3NN/ARBpKIMRpExEmbuKfV9HASyU+lzkw3kMtAb6A4mk8Zhnu++8rHd2w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[DCeVHto20](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/LTZRu6sSO22ICjRHJOSbCKf26zRdRqID>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ALBERTO ARMANDO ALVAREZ GALLEGOS | Fecha:2023-11-09 10:51:24 | Firmante

f9ClduINOomH0Pxfvnr0w2oUxDAP7GFRl0pS6A11s7v6bXdvFdsfVkouQcf+BH4gCY59Zg0Zj6lU3u9z3X8NJf0Vb3XMd6tzXLMgE5S5iwxPlktT2l6lBGB8UksKxYhdtBHVgvdcr7Rku+draUeZK0S7Hrq1xuXA/FMYVhGh4h3OX8rJhcoN8gsLmtkPftTK66Xq6Hl+1YqNJumzXYwX6rq7+3R7maUs0lrzz5s6aH/VvOouEJRymldyXHUOpfgJ1VMhua3EDgCl+JL6E6jUJEDJ6Yrofi5ubMLnbk+YD/hAi8o1FEnHFaSzdJLsKd0Z5pXZM7GIM32xtD87NA==

SUSANA SILVA MARTINEZ | Fecha:2023-11-09 17:15:28 | Firmante

olzgW1A7AwkU5t6hEUxJunz9lhLPRdahrgKJrnGwE+KyI5E0xS3f7rzmAHkISdxqXOefnTmLHV+P8VUb9Z0AF9JTJWtKh4bPcNogtnVutozZCeHdPhdps8wizFoolchcub6S1tCBtDQH9dNMkBNFtyfPs8+q2iMagwaavpKxSX4S7Hh1WTIVyqneJ4i8a5NArI8stCyhP5Pws+JEhDQ1TD91h4bazT774+nBC5X65zr8PUrgD6JZ6OQFEX929RvavanzLSu0uw6kaz+WKJvVs/FW1LTwh9YL30Ocg25m2d1eYrfhn9z8332rgQRlwjQ0LWzkM3a8ahP7D8oEvv0w==

FERNANDA MORALES GUZMAN | Fecha:2023-11-10 23:04:07 | Firmante

ELAd/NPHZjti9vdllVoPkR6wR/3vFPfn1rQkDg4puSjOBD4SE3PE3P4C8rJ6lj7iwLES5OkuMCEzcn7z1dt+RW87lAjzD0SeYDrA9xiiKV3piSHILHeHWg958rhXXouNgQVhHzzaEPijy4YeVtYqVrc+CckunpwAxCyqQl02nhursWbZ7HDKWz0LhUvAFZEgAVj1w+moKkWyfipaU7DHE1gVmXPPp68NIPDvknjc2l7fgOxIY6bpFycCLufyXwUvGmECpTLRCu9XSyfQRk4zhRr1lUuFMVRHrxNuiTHGIEdvMqaOdWabXTI9bqVjZxPyjqWWedNu+vv0QO9VxkmOw==

CARMEN HENEFF GARCIA ESCOBAR | Fecha:2023-11-21 10:46:08 | Firmante

ZXT4VsVjvtRQZ8ETmldxt2o7HQkVvwmuQ98LuvQDb3ewqL1kiKqSvljd9YfjKVx4gMvW25CtIqkuSKyvoy2FhsRKTmEBrdvFu89f+3ydtUelQ62aK01HaTY9uHtuAKf/WAtoFiafiU2W2rYOzCtbYyA4ajuR8tC57ryhLd+F3uFMmfhQ9aFQLVgv2y9UI8F8PlxpWAjJuJ2K9n4n6yJaxpmyT/y6cto6PII7//ky7aF/TX3hCZ4D49ayCsoP/ftJuKhjKvZl1wlusDFGcyPBXnqMGo4A4mjVsn48bpzf0HceKDG8IPEqzwQjz1UfYva8Hu6imR+fbINDUdZby/MJw==

ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2023-11-21 18:56:20 | Firmante

1eS1ZxOwJzGUW5eGCAGzKzEVXmQRzhGPeNc6U1yKbbySFGb/1OQVTK1vUM9CqdwEqfozN4ml9t2mT7aZToLxpxUJ4FzOQenzTcrftvwxnCVroOXCHrtYHVCSOP3MQ7BzYlwyy/QO/nELI5GrIEy+sqLElyfLUj4o9RhRu+n2pqZfUQdiBBRkPfnKnZsQk+E2YJbL2RmhpMDc0FGVE9QHg3KjAnQSLw/NjPu11plewZTubqiWkEawP7/rX/g4VHuEyewyn9hqKAeJ/thMwBMqt53Hx4tosVWqDzBjnAiPU5t+kBWE0oLv7TujvdFTE77burpD74+mLUoZw2rZA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



eYv4XZVnT

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/lzNSB2LaBlmGCig4GQFob7PVluM53RwW>

