

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PROPORCIÓN DE ILMENITA/CARBÓN
ACTIVADO SOBRE LA REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO EN UN
FOTORREACTOR A ESCALA LABORATORIO

KATHERINE CUERVO BERNAL
ANDREA CAMILA ROJAS LÓPEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D. C.
2019

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PROPORCION DE ILMENITA/CARBÓN
ACTIVADO SOBRE LA REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO EN UN
FOTORREACTOR A ESCALA LABORATORIO

KATHERINE CUERVO BERNAL
ANDREA CAMILA ROJAS LÓPEZ

Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Dr. Sc. César Augusto Quiñones Segura
Doctor en Ciencias Químicas

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D. C.
2019

Nota de aceptación

Firma del jurado Docente Investigador

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

Bogotá D. C., Febrero de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano General de la Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director de Investigaciones y Proyección Social

Dr. MANUEL CANCELADO JIMÉNEZ

Director del Departamento de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Dedico este proyecto a mi mamá, quien siempre me ha apoyado en todo lo que hago, a mi papá, quien fue pieza fundamental en este trabajo, al ayudar en todo lo que necesitáramos.

A toda mi familia, ti@s y prim@s, por estar apoyándome, a su manera, por hacerme reír siempre y por darme su mano cuando lo he necesitado.

A mi novio, por su apoyo incondicional y por hacerme feliz todos los días.

A Dios, por permitirme estar aquí, por estar a mi lado y nunca dejarme sola.

KATHERINE CUERVO BERNAL

Quiero dedicar este trabajo a Dios, por permitirme cumplir uno de mis sueños.

A mi madre, por ser la mejor del mundo, por a pesar de las circunstancias siempre guiarme y hacerme una mejor persona todos los días.

A Paula, Alejo y Orlando, por apoyarme, por escucharme y aconsejarme en cada momento difícil.

A Javier, por llegar en el momento indicado y ser la persona más bonita que he conocido.

ANDREA CAMILA ROJAS LÓPEZ

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos, principalmente, a nuestras familias, padres y hermanos, por siempre apoyarnos, brindarnos su ayuda, dándonos palabras de aliento cuando las cosas no salían de la mejor manera, por escucharnos aunque no entendieran de lo que hablábamos; infinitas gracias, sin ellos no estaríamos donde estamos y no seríamos las personas que somos ahora.

A todas las personas que colaboraron de alguna u otra manera en este proyecto, a los muchachos de monitoria de los laboratorios de física de la universidad por ayudarnos siempre que se presentaba algún problema técnico con el proyecto, y, en general, a todos los que pusieron su granito de arena en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Sc. César Augusto Quiñones Segura por el apoyo, compromiso, ayuda y orientación para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto.

A todos los integrantes del grupo de Materiales Fotoactivos por su compromiso, colaboración y trabajo en equipo para dar cumplimiento a los objetivos de cada proyecto.

Katherine Cuervo Bernal y Andrea Camila Rojas López

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	19
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	20
1.1 PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN	20
1.1.1 Fotocatálisis heterogénea.	20
1.2 ILMENITA	21
1.3 CARBÓN ACTIVADO	23
1.4 MEZCLAS	23
1.5 AZUL DE METILENO	24
1.6 FOTORREACTOR	25
1.7 ARDUINO	25
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	26
2.1 METODOLOGÍA	26
2.2 ETAPA 1: FOTORREACTOR DESARROLADO EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN MATERIALES FOTOACTIVOS	27
2.2.1 Fotorreactor desarrollado en el grupo de Materiales Fotoactivos.	27
2.2.2 Discos de la mezcla fotocatalítica etapa 1.	27
2.2.2.1 Preparación de los discos I/AC	29
2.2.3 Curva de calibración de AM etapa 1.	30
2.3 ETAPA 2: FOTORREACTOR A ESCALA LABORATORIO MONITOREADO POR ARDUINO	32
2.3.1 Estructura interna del reactor.	32
2.3.2 Estructura externa del reactor.	34
2.3.3 Discos de la mezcla fotocatalítica para la etapa 2.	36
2.3.3.1 Preparación de los discos I/AC.	37
2.3.4 Seguimiento muestral.	37
2.3.4.1 Tarjeta de adquisición de datos.	37
2.3.4.2 Sensor de luz.	38
2.3.4.3 Conexión Arduino Uno R3 y sensor.	40
2.3.4.4 Software de control.	41
2.3.5 Curva de calibración reactor.	41
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA	43
3.1.1 Caracterización morfológica.	43
3.1.2 Caracterización estructural.	45
3.2 EVALUACIÓN ETAPA 1	46
3.3 EVALUACIÓN ETAPA 2	52

4.	CONCLUSIONES	59
5.	RECOMENDACIONES	60
	BIBLIOGRAFÍA	61
	ANEXOS	66

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición química de la Ilmenita.	22
Tabla 2. Porcentajes de remoción de AM con diferentes materiales.	28
Tabla 3. Composición de la mezcla fotocatalítica en los discos de prueba.	29
Tabla 4. Datos de concentraciones y absorbancias para la curva de calibración del AM.	31
Tabla 5. Composición de la mezcla fotocatalítica en los discos empleados en el fotorreactor de 456 mL.	36
Tabla 6. Comparación entre las tarjetas de adquisición de datos.	38
Tabla 7. Comparación de sensores de luz visible compatibles con Arduino.	39
Tabla 8. Conexiones Arduino y sensor de luz.	40
Tabla 9. Datos de concentraciones y señales de luz para la curva de calibración del AM.	42
Tabla 10. Porcentajes de remoción obtenidos en la etapa 1.	46
Tabla 11. Composiciones y mayor porcentaje de remoción de AM en la etapa 1.	50
Tabla 12. Porcentajes de remoción de AM obtenidos en la etapa 2.	52
Tabla 13. Composiciones y mayor porcentaje de remoción de AM en la etapa 2.	55

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Curva de calibración para el AM de la etapa 1. OriginPro 2017.	31
Gráfica 2. Curva de calibración para el AM de la etapa 2. OriginPro 2017.	42
Gráfica 3. Caracterización estructural de I. OriginPro 2017.	45
Gráfica 4. Caracterización estructural de la mezcla I/AC. OriginPro 2017.	46
Gráfica 5. Usos del disco 10% I – 90% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.	47
Gráfica 6. Usos del disco 30% I – 70% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.	48
Gráfica 7. Usos del disco 50% I – 50% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.	48
Gráfica 8. Usos del disco 70% I – 30% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.	49
Gráfica 9. Usos del disco 90% I – 10% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.	50
Gráfica 10. Usos en los cuales se obtienen los mayores porcentajes de remoción de AM para los diferentes discos. OriginPro 2017.	51
Gráfica 11. Usos del disco 10% I – 90% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.	52
Gráfica 12. Usos del disco 30% I – 70% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.	53
Gráfica 13. Usos del disco 50% I – 50% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.	54
Gráfica 14. Usos del disco 70% I – 30% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.	54
Gráfica 15. Usos del disco 90% I – 10% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.	55
Gráfica 16. Usos en los que se obtuvo el mayor porcentaje de remoción de AM en la etapa 2. OriginPro 2017.	56
Gráfica 17. Remociones de AM con discos de 2 g de ilmenita.	57
Gráfica 18. Prueba fotodegradación para todas las muestras limpias.	58

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Estructura química del AM.	24
Ilustración 2. Reacción de degradación de AM.	24
Ilustración 3. Metodología empleada para el desarrollo del proyecto.	26
Ilustración 4. Fotorreactor desarrollado en el grupo de materiales fotoactivos.	27
Ilustración 5. Disco con junta tórica (o-ring).	28
Ilustración 6. Disco al cual se le agregó la mezcla fotocatalítica.	29
Ilustración 7. Preparación de los discos I/AC.	30
Ilustración 8. Soluciones de 1 hasta 10ppm de AM.	30
Ilustración 9. Estructura interna del reactor.	33
Ilustración 10. Vista interna del fotorreactor.	33
Ilustración 11. Tubo externo del reactor.	34
Ilustración 12. Tapa superior.	34
Ilustración 13. Tapa inferior.	35
Ilustración 14. Estructura externa del reactor.	35
Ilustración 15. Fotorreactor vista externa.	36
Ilustración 16. Disposición de discos y burbujeo.	37
Ilustración 17. Tarjeta Arduino Uno R3.	38
Ilustración 18. Sensor de luz TSL 2591.	39
Ilustración 19. Conexión entre tarjeta Arduino UNO R3 y sensor TSL 2591.	40
Ilustración 20. Parte de la programación del sensor TSL 2591 en el programa Arduino version 1.8.5.	41
Ilustración 21. Vista AC en polvo en el microscópio óptico.	43
Ilustración 22. Vista I en el microscópio óptico.	44
Ilustración 23. Vista de la mezcla fotocatalítica en el microscópio óptico.	44

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Certificado de origen Ilmenita.	67
Anexo B. Hoja de seguridad carbón activado Clarimex.	69
Anexo C. Plano tubo externo explosionado del fotorreactor.	70
Anexo D. Estructura interna del fotorreactor.	71
Anexo E. Tubo externo del fotorreactor.	72
Anexo F. Tapa del fotorreactor.	73
Anexo G. Tapa perforada del fotorreactor.	74

LISTA DE ABREVIATURAS

AM	Azul de metileno
AC	Carbón Activado
DRX	Difracción de rayos x
g	Gramos
I	Ilmenita
F	Fondos
lux	Nivel de iluminación
mL	Mililitros
nm	Nanómetros
ppm	Partes por millón
U1	Uso 1
U2	Uso 2
U3	Uso 3
U4	Uso 4
ST	Sin tamizar

GLOSARIO

ADSORCIÓN: proceso en el cual componentes presentes en gases, líquidos, o sustancias disueltas son selectivamente retenidas en la superficie de un sólido. Su principal uso es la remoción de componentes que de lo contrario serían dañinos para el ambiente o podrían causar el envenenamiento del catalizador en los procesos.

AZUL DE METILENO: cloruro de tetrametilitionina, soluble en agua y etanol, de color intenso. Es reducible a un compuesto leuco, es reoxidable por dióxígeno y, por lo tanto, se puede utilizar como indicador redox. Posee forma de cristales o polvo cristalino de color verde oscuro.

DEGRADACIÓN: descomposición de la estructura química, las propiedades físicas o apariencia de un material mediante la exposición del mismo al calor, la luz, el oxígeno o el desgaste.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX): es una técnica que sirve para determinar la estructura detallada de un material, es decir, permite conocer la posición que ocupan los átomos, iones o moléculas que lo forman y por tanto determinar propiedades físicas y químicas de ciertos materiales.

FOTOCATÁLISIS: es el cambio de la velocidad o iniciación que presenta una reacción química debido a un fotocatalizador provocando la transformación química de las sustancias en la reacción, mediante un proceso de óxido-reducción. Los fotones son absorbidos por un catalizador, generando una reacción que generalmente consiste en la generación de par electrón-hueco, que conlleva a nuevos procesos, principalmente de oxidación por la excitación de un semiconductor.

LEY DE LAMBERT-BEER: ley en la cual es establecida una relación lineal entre la absorción de la luz y la concentración de una sustancia.

LUX: unidad de medida para el nivel de iluminación equivalente a un lumen/m², usado en fotometría como medida de intensidad luminosa partiendo de la sensibilidad a la luz del ojo humano. La diferencia entre lux y lúmenes consiste en que el lux toma en cuenta la superficie sobre la cual el flujo luminoso se distribuye en 1000 lúmenes.

RESUMEN

En el presente trabajo de grado, se evaluó la proporción de ilmenita y carbón activado para la remoción del azul de metileno, para esto, inicialmente se fabricaron unos discos de prueba de 0,5 g, los cuales fueron sometidos a luz visible y burbujeo en reactores de prueba de 25 mL, esto se realizó con el fin de determinar cuál era el disco cuya composición permitía la mayor remoción de colorante y el número de usos necesarios para el logro de este objetivo, posteriormente, se construyó un fotorreactor de 456 mL, el cual fue monitoreado por el programa ARDUINO, dentro de este fotorreactor, habían anillos con muestras de 2 g de la mezcla fotocatalítica y mediante el uso de un sensor TSL 2591 que iba unido a una tarjeta ARDUINO UNO R3, se pudo obtener los datos de nivel de iluminación (lux) en un computador. El propósito fue determinar la composición que lograba remover más de un 90% de colorante. Al realizar este experimento, se obtuvo que la mezcla que proporcionó la mejor remoción de azul de metileno fue la que contenía 50% I – 50% AC.

Palabras clave: Proporción, ilmenita, carbón activado, remoción, Arduino, nivel de iluminación.

INTRODUCCIÓN

Una de las mayores problemáticas existentes en el mundo actual, es el mal manejo de las aguas, según el diario La República, la tasa de crecimiento de la población, el cambio climático y el desperdicio del preciado líquido, producirá escasez para el año 2040¹. Actualmente, en varios municipios de Colombia, se presentan denuncias relacionadas con la calidad del agua, esto debido a que hay comunidades a las que se les proporciona agua turbia por la corrosión en las tuberías², mientras que otras comunidades no tienen acceso al agua por la contaminación de las fuentes hídricas³.

A causa de lo anteriormente expuesto, las publicaciones en materiales fotocatalíticos presentadas en el portal Science Direct, han incrementado notablemente desde el año 2007, razón por la cual en lo corrido del 2018 existen 5483 artículos relacionados con fotocatalisis para la descontaminación del agua⁴, de los cuales, 1288 están relacionados con el dióxido de titanio⁵.

El presente trabajo de grado pretende evaluar la proporción de ilmenita, que es dióxido de titanio modificado naturalmente, y carbón activado, que es un material conocido a nivel mundial por sus propiedades de adsorción, que remueva la mayor cantidad de azul de metileno en agua, esto se realizará en un fotorreactor a escala laboratorio, el cual estará monitoreado por el programa Arduino.

¹ CLAVIJO, Sergio. La problemática del agua. Septiembre 24. [Consultado el 07 de septiembre del 2018]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/analisis/sergio-clavijo-456041/la-problematica-del-agua-2551905>

² MUNERA, Melissa. Denuncian contaminación en el agua potable de Barrancabermeja. Agosto 23, [Consultado el 8 de septiembre 2018]. Disponible en: <https://www.rcnradio.com/colombia/santanderes/denuncian-contaminacion-en-el-agua-potable-de-barrancabermeja>

³ MONSALVE, Ricardo. Fiebre del oro poco a poco acaba con el agua de 152 municipios. Agosto 29,. [Consultado el 08 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.elcolombiano.com/colombia/fiebre-del-oro-poco-a-poco-acaba-con-el-agua-de-152-municipios-FY9221986>

⁴ Science Direct. [Consultado el 08]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/search?qs=photocatalysis%20water&show=25&sortBy=relevance>

⁵ Science Direct. [Consultado el 08 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/search?qs=photocatalysis%20TiO2%20water&show=25&sortBy=relevance>

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la proporción ilmenita/carbón activado sobre la remoción de azul de metileno en un fotorreactor a escala laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Implementar un fotorreactor a escala laboratorio monitoreado por Arduino.
2. Preparar y caracterizar las diferentes mezclas de ilmenita/carbón activado en el sistema fotocatalítico.
3. Adecuar un sistema de disposición removible de la mezcla en el fotorreactor.
4. Seleccionar la mezcla con el mayor porcentaje de remoción de azul de metileno en el sistema fotocatalítico.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo, se indagan conceptos relacionados con el sistema fotocatalítico.

1.1 PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Son procesos que generan radicales hidroxilos (OH^\cdot) altamente reactivos⁶ a condiciones ambientales⁷. Los contaminantes solubles no biodegradables presentes en las aguas residuales⁸ se destruyen por medio de los radicales hidroxilos y los transforman en compuestos inofensivos para el medio ambiente⁹. Los procesos de oxidación avanzados (AOP siglas en inglés) son aplicados generalmente en pequeña o mediana escala y especialmente donde los métodos convencionales pierden eficiencia. No generan subproductos que requieran otro procesamiento y son ideales para preparar las corrientes a tratamientos convencionales¹⁰. Los procesos de oxidación avanzados más comunes son: ozonización, Foto-Fenton¹¹, radiólisis, oxidación electroquímica y fotocatalisis heterogénea¹².

1.1.1 Fotocatálisis heterogénea. La fotocatalisis ha demostrado ser una tecnología prometedora, sus aplicaciones potenciales han sido investigadas a fondo¹³. El proceso fotocatalítico heterogéneo está basado en la excitación de un semiconductor mediante la absorción de luz de distintas longitudes de onda¹⁴, es

⁶ GARCÉS GIRALDO, Luis F.; MEJÍA FRANCO, Edwin A.; SANTAMARÍA ARANGO, Jorge J. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, 2009. 84 p.

⁷ VAN DOORSLAER, Xander; DEWULF, Jo; DE MAERSCHALK, Jorik; VAN LANGENHOVE, Herman; DEMEESTERE, Kristof. Heterogeneous photocatalysis of moxifloxacin in hospital effluent: Effect of selected matrix constituents. En: Chemical Engineering Journal. 2015. p 9-16.

⁸ CASTAÑEDA JIMÉNEZ, Amparo Carolina. Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo. Proyecto de grado para optar al título Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Bogotá D.C. Escuela Colombiana e Ingeniería "Julio Garavito" 2014. p 14.

⁹ ARROYAVE ROJAS, Joan A.; GARCÉS GIRALDO, Luis F.; ARANGO RUIZ, Álvaro; AGUDELO LÓPEZ, Carlota M. La Tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada. En: Revista Lasallista de Investigación. Vol. 5 No. 1. 2008. p 22.

¹⁰ FORERO, Jorge E.; ORTIZ, Olga p.; RIOS, Fabian. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. En: CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro. Vol. 3 No. 1. 2005. p 99.

¹¹ VAN DOORSLAER, Xander; DEWULF, Jo; DE MAERSCHALK, Jorik; VAN LANGENHOVE, Herman; DEMEESTERE, Kristof., Op.cit., p. 9-16.

¹² CASTAÑEDA JIMÉNEZ, Amparo Carolina. Op. cit., p 14.

¹³ CASADO et al. Design and validation of LED-based high intensity photocatalytic reactor for quantifying activity measurements. En: Chemical Engineering Journal. 2017. p 1043-1055.

¹⁴ CARBAJO OLLEROS, Jaime. Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO_2 . Tesis para

decir, consiste en la absorción directa o indirecta por un semiconductor de fotones de luz, visible o UV¹⁵; en presencia de especies redox adsorbidas en el semiconductor y bajo iluminación, se producen simultáneamente reacciones de oxidación y reducción en la superficie del semiconductor¹⁶, al realizarse la absorción de fotones se crean pares electrón-hueco, que se disocian en fotoelectrones libres en la banda de conducción y en fotohuecos en la banda de valencia¹⁷, los huecos fotogenerados dan lugar a reacciones de foto-oxidación, mientras que los electrones de la banda de conducción dan lugar a las reacciones de foto-reducción¹⁸.

Hasta la fecha, se han probado más de 190 semiconductores como fotocatalizadores apropiados¹⁹ tales como TiO₂, ZnO, CeO₂, ZrO₂, SnO₂, CdS, ZnS, entre otros²⁰. El TiO₂ es de los semiconductores más utilizados en la fotocatálisis, pero no se considera una alternativa viable debido a que solo absorbe luz UV²¹.

1.2 ILMENITA

La ilmenita (FeTiO₃) es uno de los minerales más abundantes que se encuentra en la corteza terrestre²², es un mineral débilmente magnético y semiconductor²³. Se ha utilizado tradicionalmente como materia prima para la producción de TiO₂, así como para celdas solares, sensores de gas y como catalizador²⁴.

optar al grado de Doctor en Mención Europea. Madrid, España. Universidad Autónoma de Madrid. 2013. p 30.

¹⁵ GUARÍN LLANES, Carolay Y.; MERA BENAVIDES, Adriana C. Fotocatálisis heterogénea con TiO₂ para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 2011. p 81.

¹⁶ CASTAÑEDA JIMÉNEZ, Amparo Carolina. Op. cit., p 36.

¹⁷ HERRMANN, J.M. Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatálisis heterogénea. En: Solar Safe Water. p 154.

¹⁸ CASTAÑEDA JIMÉNEZ, Amparo Carolina. Op. cit., p 14.36.

¹⁹ HASSAN, M.; ZHAO, Y.; XIE, B. Employing TiO₂ photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development. En: Chemical Engineering Journal. 2015.

²⁰ HERRMANN, J.M. Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatálisis heterogénea. En: Solar Safe Water. p 156.

²¹ HASSAN, M.; ZHAO, Y.; XIE, B. Op. cit., p 49.

²² CHEN, Y.H. Synthesis, characterization and dye adsorption of ilmenite nanoparticles. En: Journal of Non-Crystalline Solids. 2011. p 136.

²³ MEHDILO, A.; IRANNAJAD, M.; REZEI, B. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effects on physical and surface properties. En: Minerals Engineering. 2015. p 64-76.

²⁴ GARCÍA-MUÑOZ, P.; PLIEGO, G.; ZAZO, J.A.; BAHAMONDE, A.; CASAS, J.A. Ilmenite (FeTiO₃) as low cost for advanced oxidation processes. En: Journal of Environmental Chemical Engineering. 2016. p 542.

Tabla 1. Composición química de la Ilmenita.

Compuesto químico	Composición (%)
Na ₂ O	0,2
MgO	1,2
Al ₂ O ₃	1,0
SiO ₂	4,1
P ₂ O ₅	0,3
SO ₃	<0,1
K ₂ O	0,1
CaO	0,5
TiO ₂	47,3
CrO ₃	0,1
MnO	0,5
Fe ₂ O ₃	44,6
ZnO	<0,1
ZrO ₂	0,1
Nb ₂ O ₅	<0,1

Fuente: ORTIZ, Diógenes. Distribuidores de ilmenita. [Citado el septiembre 09 2018]. Disponible en: <http://distribuidoresdeilmenita.com/>.

Al ser la ilmenita dióxido de titanio naturalmente modificado, esta posee un porcentaje mayor del 40% de TiO₂, la fórmula química de la ilmenita se expresa como FeTiO₃²⁵. Su band gap es muy amplio (2,58 a 2,9 eV), lo cual le permite a este compuesto remover contaminantes bajo radiación visible a diferencia del dióxido de titanio sin modificar²⁶.

²⁵ GOU, H.; ZHANG, G.; HU, X.; CHOU, K. Kinetic study on carbothermic reduction of ilmenite with activated carbon. En: Elsevier. 2017. p 1856.

²⁶ CHEN, Y.H., Journal of Non-Crystalline Solids. Op., Cit., p136

1.3 CARBÓN ACTIVADO

Es un mineral carbonoso, microcristalino y no grafitico²⁷, es un adsorbente usualmente utilizado para remover metales acuosos por su excelente estructura porosa, es reutilizable, tiene un costo bajo y amigable con el medio ambiente²⁸.

El carbón activado se obtiene, tradicionalmente, de la madera, el carbón, residuos de petróleo, polímeros, los cuales son muy costosos y, a excepción de la madera, no renovables²⁹.

1.4 MEZCLAS

El dióxido de titanio, TiO₂ posee tres fases cristalinas diferentes, las cuales son, brookita, anatasa y rutilo, en donde, en la fase anatasa, se ha encontrado la capacidad de este mineral para descomponer moléculas, es así, como surge la necesidad de incrementar su actividad fotocatalítica con el fin mejorar el poder de descomposición y aplicar este mineralo como alternativa de limpieza ambiental³⁰.

La mezcla entre carbón activado y dióxido de titanio ha sido utilizada con el fin de mejorar la descomposición de contaminantes en soluciones acuosas.

Los materiales adsorbentes son de interés a la hora de trabajar con óxidos para la fotodegradación de contaminantes, sin embargo, la unión de estos dos materiales generalmente es empleada para la creación de compósitos, lo cual se refiere a la unión de mínimo dos materiales, cuando se realizan dichos compósitos, el carbón activado al ser un material con gran área superficial y extrema porosidad facilita el aumento en la velocidad de fotodegradación, permitiendo que una amplia cantidad de contaminante entre en contacto con el dióxido de titanio a través de sus poros³¹.

²⁷ MARTINEZ, Alicia. Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano. Universidad San Jorge. 2012. p 4.

²⁸ IANNICELLI-ZUBIANI, Elena M.; GALLO STAMPINO, Paola; CRISTIANI, Cinzia. Enhanced lanthanum adsorption by amine modified activated carbon. En: Chemical Engineering Journal. 2018.

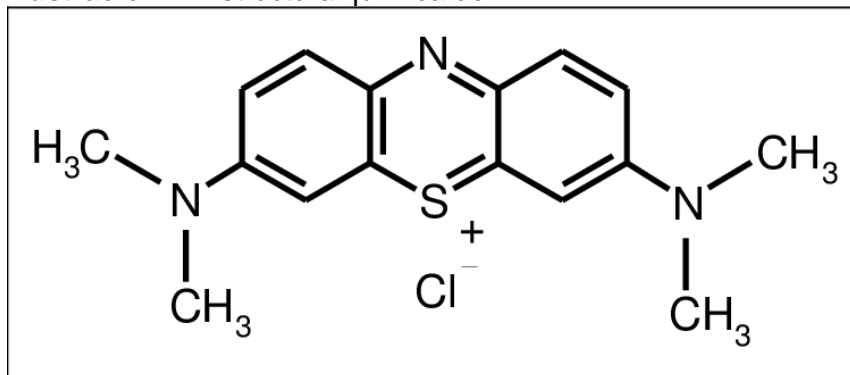
²⁹ PALLARÉS, Javier; GONZÁLEZ-CENCERRADO, Ana; ARAUZO, Inmaculada. Production of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. En: Biomass and Bioenergy. 2018. p 64.

³⁰ Inagaki, M.; Kang, F.; Toyoda, M.; Konno, H. (2014). *Advanced Materials Science and Engineering of Carbon - 13. Carbon Materials in Photocatalysis*. pp. 289,290. [Consultado el 10 de diciembre de 2018] Elsevier. Obtenido de: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U72381/advanced-materials-science/carbon-materials-in-photocatalysis>

³¹ MURILLO, Herman. Obtención de un compósito de dióxido de titanio y carbón activado aplicado a la oxidación fotocatalítica del ión cianuro. Escuela Politécnica Nacional, 2015. p. 9

1.5 AZUL DE METILENO

Ilustración 1. Estructura química del AM.



Fuente: CLAVIJO, Julio, Sobre las reacciones de eliminación de compuestos contaminantes de aguas por fotocátalisis con TiO₂/UV: caso azul de metileno Universidad de América. En: VIRTUAL PRO. 2013, p. 152.

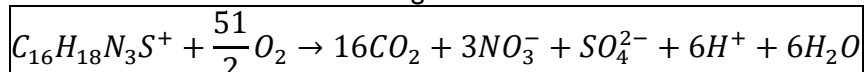
El uso de la luz visible para la remoción de contaminantes ha sido objeto de estudio en la actualidad, esto debido a que al provenir del sol disminuye costos.

Los procesos de remoción pueden realizarse a moléculas tanto orgánicas como inorgánicas, en donde los colorantes, han sido las moléculas de mayor estudio debido a su fácil seguimiento por medio de técnicas como la espectrofotometría³².

El azul de metileno es un colorante orgánico típico ampliamente utilizado en la industria textil, el cual es tomado como una molécula representativa de los diferentes contaminantes existentes en el agua, dicha molécula puede ser degradada mediante fotocátalisis, lo anterior se realiza mediante la relación entre concentración y absorbancia o curva de Lambert-Beer.

La degradación de AM viene dada por la reacción mostrada en la **Ilustración 2**, en donde el AM termina produciendo compuestos inofensivos para la vida acuática³³.

Ilustración 2. Reacción de degradación de AM.



Fuente: CLAVIJO, Julio, Sobre las reacciones de eliminación de compuestos contaminantes de aguas por fotocátalisis con TiO₂/UV: caso azul de metileno Universidad de América. En: VIRTUAL PRO. 2013, p. 150-154.

³² CLAVIJO, Julio. Sobre las reacciones de eliminación de compuestos contaminantes de aguas por fotocátalisis con TiO₂ /UV: caso azul de metileno. En: REVISTA DE ELEMENTOS. no. 3, p. 150-152

³³ CLAVIJO, Julio. Op. cit., p. 150-152.

Proyectos de grado como “Degradación del azul de metileno y verde de malaquita por fotocatalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio dopado con nitrógeno (N-TiO₂) bajo luz visible”³⁴ realizado por BAICUE Juan, “Evaluación de la actividad fotocatalítica del TiO₂ soportado en carbón activado para la degradación del azul de metileno”³⁵ realizado por DIAZ David y PERDOMO Karen, “Degradación del azul de metileno y 4-Clorofenol por fotocatalisis con luz ultravioleta, utilizando TiO₂ como catalizador”³⁶ realizado por HERNÁNDEZ Alma, “Construcción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita”³⁷ realizado por BELTRÁN Tatiana y RIVERA Cristian, entre otros, se han basado en el uso de la fotocatalisis heterogénea para la remoción de azul de metileno como molécula representativa.

1.6 FOTORREACTOR

Al ser la fotólisis el rompimiento de una molécula en unidades más sencillas debido a la absorción de la luz es necesario el uso de un fotorreactor que proporcione una distribución de luz uniforme a lo largo del sistema fotocatalítico, esto debería proporcionar una gran área de exposición a la radiación y al mismo tiempo, debería facilitar el rompimiento de dichas moléculas³⁸.

1.7 ARDUINO

Es una plataforma libre, la cual basa su funcionamiento en hardware libre, es decir, dispositivos cuyos diagramas y especificaciones son de acceso público y, software libre, lo que indica que los códigos empleados por este programa son accesibles para quien desee utilizarlo y modificarlo. En las tarjetas Arduino, es posible conectar las entradas y salidas de un microcontrolador, las cuales pueden ser programadas en cualquier sistema operativo³⁹.

³⁴ BAICUE, Juan. Degradación del azul de metileno y verde de malaquita por fotocatalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio dopado con nitrógeno (N-TiO₂) bajo luz visible. Universidad Tecnológica de Pereira. 2015

³⁵ DIAZ, David and PERDOMO, Karen. Evaluación de la actividad fotocatalítica del TiO₂ soportado en carbón activado para la degradación de azul de metileno. Fundación Universidad de América, 2018.

³⁶ HERNÁNDEZ, Alma. Degradación del azul de metileno y 4-Clorofenol por fotocatalisis con luz ultravioleta, utilizando TiO₂ como catalizador. Instituto Tecnológico de Toluca. 2010

³⁷ BELTRAN, Tatiana and RIVERA, Cristian. Costrucción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita. Fundación Universidad de América, 2018

³⁸ BASILE, Angelo and DALENA, Francesco. Methanol - Science and Engineering - 16.6 Photoreactor. [Consultado el 26 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011G6LB2/methanol-science-engineering/photoreactor>

³⁹ YUBAL. ¿Qué es Arduino, cómo funciona? Agosto 03, [Consultado el 07 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>

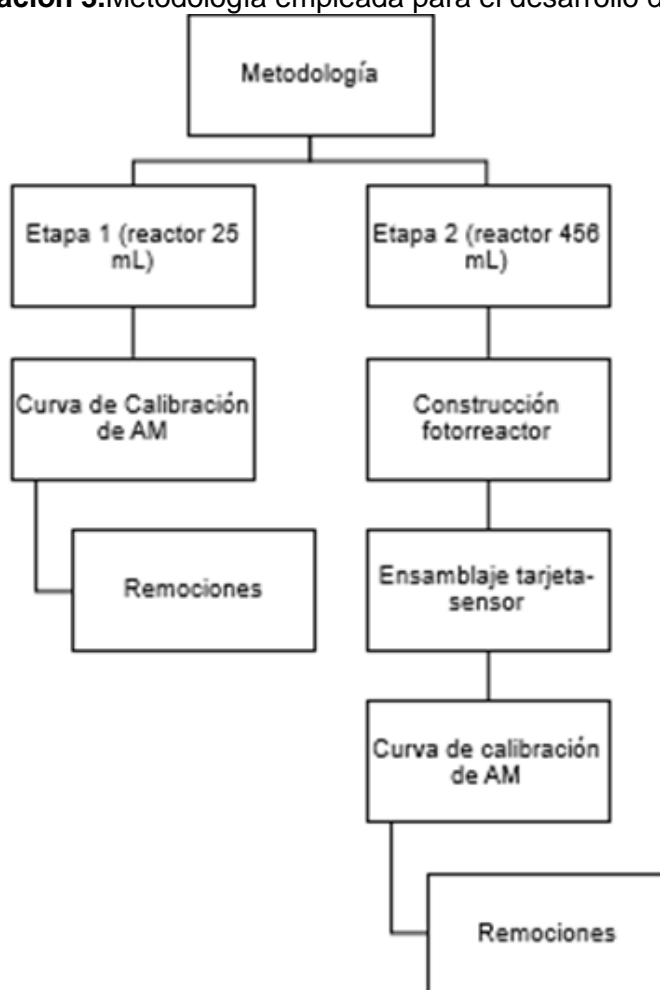
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo, se presenta el desarrollo experimental del proyecto.

2.1 METODOLOGÍA

En la **Ilustración 3**, es posible evidenciar la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo del presente proyecto, en donde, para lograr la evaluación de la proporción de I/AC sobre la remoción de AM, el desarrollo experimental se divide en dos etapas, una etapa (1) realizada en fotorreactores desarrollados en el grupo de investigación Materiales Fotoactivos, y otra etapa (2) realizada en un fotorreactor a escala laboratorio monitoreado por Arduino, se realizaron dos etapas en este proyecto con el fin de comparar los porcentajes de remoción AM obtenidos.

Ilustración 3. Metodología empleada para el desarrollo del proyecto.



Fuente: Elaboración Autores.

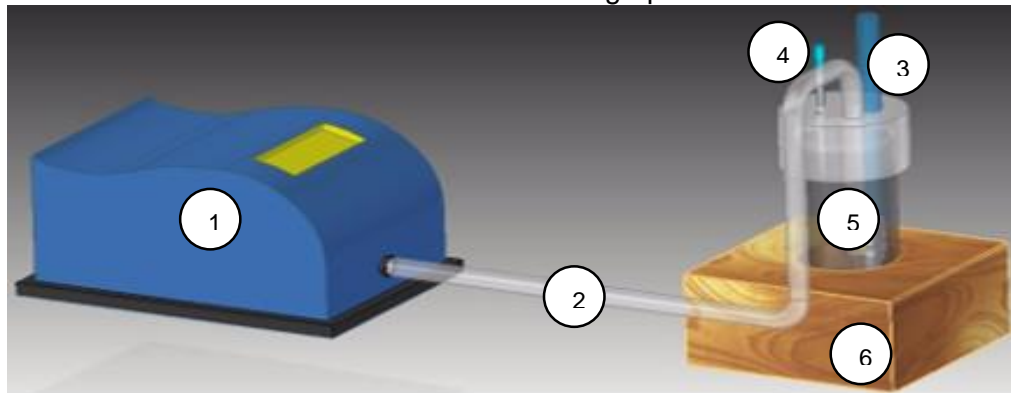
2.2 ETAPA 1: FOTORREACTOR DESARROLLADO EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN MATERIALES FOTOACTIVOS

En esta etapa, se hizo uso del fotorreactor de operación por lotes desarrollado en el grupo de Materiales Fotoactivos y se midieron las absorbancias por medio del espectrofotómetro Spectroquant Prove 300 durante 60 minutos, para finalmente obtener los valores de las concentraciones mediante la ley de Lambert- Beer, con el fin de probar si la mezcla fotocatalítica removía el contaminante del agua.

2.2.1 Fotorreactor desarrollado en el grupo de Materiales Fotoactivos. En la **Ilustración 4**, se puede observar el fotorreactor desarrollado en el grupo de materiales fotoactivos, en donde; **1**, es una bomba de pecera que proporciona la aireación, **2**, es la manguera por la cual ingresa la aireación al fotorreactor, **3** es un LED que proporciona luz visible al fotorreactor, **4** representa una jeringa la cual permite la toma de muestras cuya absorbancia fue medida en el espectrofotómetro Spectroquant Prove 300, **5** es un contenedor de 25 mL en donde se introdujo la aireación, la luz, solución de AM y la mezcla fotocatalítica, **6** es una base de madera que proporciona el soporte al sistema fotocatalítico.

La operación del fotorreactor mostrado en la **Ilustración 4**, fue por lotes, lo que indica que una vez el AM llegó a su menor concentración pasados 60 minutos, se cargó el fotorreactor con una nueva solución de AM.

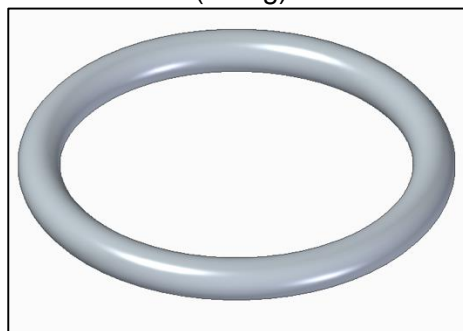
Ilustración 4. Fotorreactor desarrollado en el grupo de materiales fotoactivos.



Fuente: APONTE, Andrés y BENAVIDES, Diana. Adecuación de un sistema sustentable de bajo costo para la purificación de agua lluvia con fotocátalisis solar. Fundación Universidad de América. 2017. p. 34.

2.2.2 Discos de la mezcla fotocatalítica etapa 1. Con el fin de tener una manera de introducir la mezcla fotocatalítica de forma sencilla y rápida dentro del fotorreactor de 25 mL, se utilizaron unos discos con una junta tórica (o-ring), Ilustración 5, cuyo diámetro era de 2,5 cm.

Ilustración 5. Disco con junta tórica (o-ring).



Fuente: Elaboración Autores.

La tela quirúrgica fue elegida, por su economía, fácil acceso, pero sobre todo debido a que los porcentajes de remoción de AM obtenidos por BELTRAN Tatiana y RIVERA Cristian en el proyecto “Construcción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita”⁴⁰ bajo las mismas condiciones de luz, aireación y concentración fueron los segundos mejores y los más consistentes tanto para los discos que poseían la I sin tamizar como para los discos cuya I fue la que quedó en los fondos después de tamizar, como se evidencia en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Porcentajes de remoción de AM con diferentes materiales.

Material	% Remoción ST	% Remoción F
Papel filtro	73,6	72,5
Tela lienzo	93,4	64,2
Tela quirúrgica	72,9	77,3

Fuente: BELTRAN, Tatiana y RIVERA, Cristian. Construcción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita. Fundación Universidad de América, 2018. p. 59.

En la **Tabla 3**, se evidencian las composiciones de los diferentes discos de I y AC, en donde en la parte izquierda las proporciones se encuentran representadas en forma de porcentajes, mientras que en la parte derecha dichas proporciones están traducidas en gramos, donde el peso total de cada disco es de 0,5 g, dicho peso fue obtenido mediante una balanza analítica Standart con cabina la cual posee un margen de error de $\pm 0,003$ g.

⁴⁰ BELTRAN, Tatiana y RIVERA, Cristian. Construcción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita. Fundación Universidad de América, 2018. p. 59.

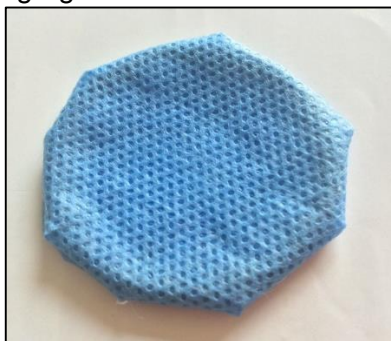
Tabla 3. Composición de la mezcla fotocatalítica en los discos de prueba.

%I	%AC	I (g)	AC (g)
10	90	0,05	0,45
30	70	0,15	0,35
50	50	0,25	0,25
70	30	0,35	0,15
90	10	0,45	0,05

Fuente: Elaboración Autores.

En la **Ilustración 6**, se evidencia la unión entre el o-ring y la tela quirúrgica en lo que en el proyecto fueron denominados discos, los cuales contenían la mezcla fotocatalítica y fueron sometidos a cuatro usos, U1, U2, U3, U4, cada uso fue evaluado en un período de 60 minutos, con el fin de determinar el número de usos necesarios para la obtención del mayor porcentaje de remoción de AM para cada proporción en las diferentes etapas.

Ilustración 6. Disco al cual se le agregó la mezcla fotocatalítica.

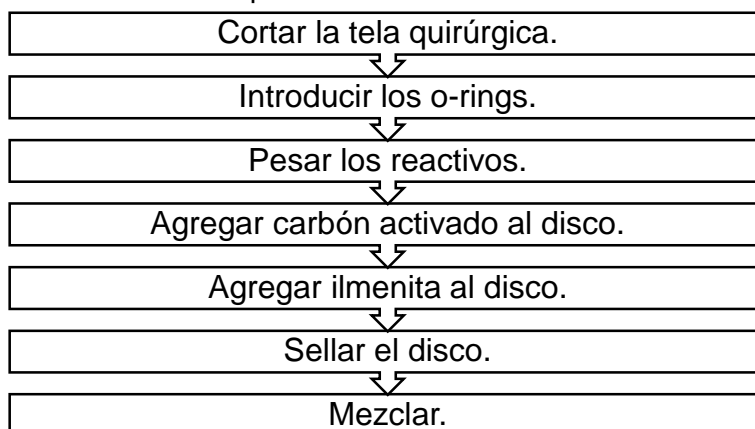


Fuente: Elaboración Autores..

Se utilizaron cuatro veces los discos de prueba para la remoción de una solución de AM con una concentración de 5 ppm.

2.2.2.1 Preparación de los discos I/AC. En la Ilustración 7, se pueden evidenciar los pasos que se siguieron para la elaboración de los discos, en donde inicialmente, se cortó la tela según diámetro de los o-rings, con el fin de darle la forma al disco, posteriormente, se pesaron los reactivos por separado y finalmente, se introdujo inicialmente el AC seguido por la I, se realizó de esta manera, debido a que al ser el tamaño de partícula del AC menor al de la I, era fácil que esta última se quedara en los fondos del disco, lo cual no garantizaría un correcto mezclado entre la I y el AC.

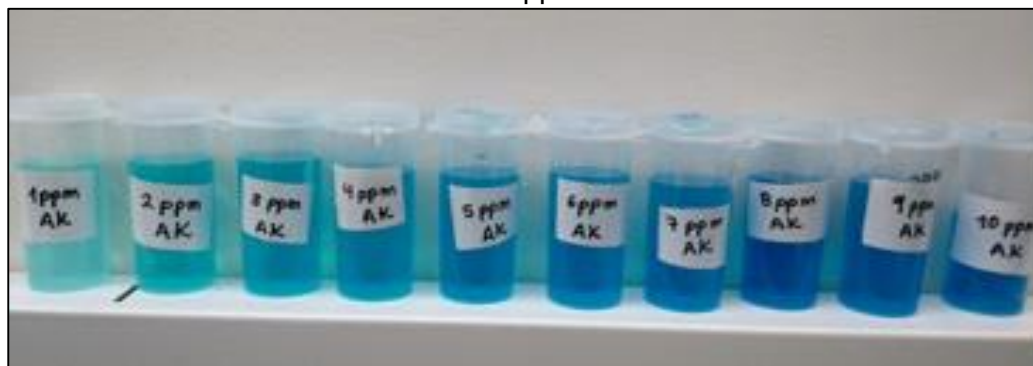
Ilustración 7. Preparación de los discos I/AC.



Fuente: Elaboración Autores.

2.2.3 Curva de calibración de AM etapa 1. Se partió de una solución de 100 ppm y se prepararon soluciones de 1 hasta 10 ppm de AM, con el protocolo realizado por APONTE Andrés y BENAVIDES Diana en el proyecto de grado “Adecuación de un sistema sustentable de bajo costo para la purificación de agua lluvia con fotocátalisis solar”⁴¹, realizando una curva de calibración donde se obtuvo una relación entre la absorbancia y la concentración de las soluciones, relación descrita por la ley de Lambert Beer.

Ilustración 8. Soluciones de 1 hasta 10ppm de AM.



Fuente: Elaboración Autores.

⁴¹ APONTE, Andrés; BENAVIDES, Diana. Adecuación de un sistema sustentable de bajo costo para la purificación de agua lluvia con fotocátalisis solar. Fundación Universidad de América. 2017. p. 32.

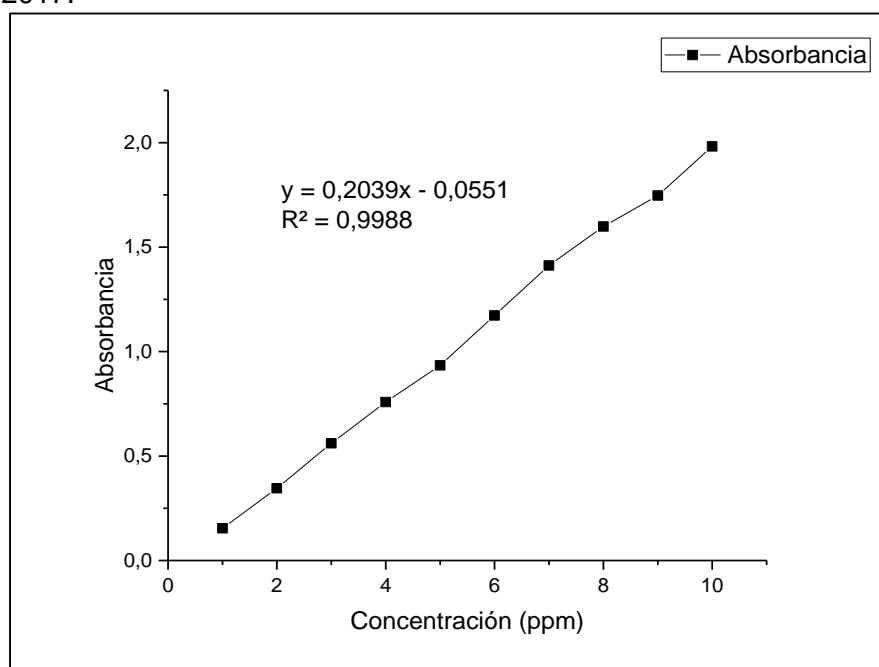
Tabla 4. Datos de concentraciones y absorbancias para la curva de calibración del AM.

Concentraciones (ppm)	Absorbancias
1	0,154
2	0,346
3	0,561
4	0,758
5	0,934
6	1,173
7	1,412
8	1,599
9	1,747
10	1,982

Fuente: Elaboración Autores.

La **Tabla 4**, muestra las absorbancias obtenidas para las diferentes concentraciones de AM a una longitud de onda medida en el espectrofotómetro Spectroquant Prove 300 igual a 665 nm⁴².

Gráfica 1. Curva de calibración para el AM de la etapa 1. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

⁴² ROSAS, Jose. Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes. Universidad Autónoma de Nuevo León, 2012. p. 4.

Para calcular el porcentaje de remoción y/o adsorción de AM, se utiliza la **Ecuación 1**.

Ecuación 1. Eficiencia de remoción y/o adsorción de AM

$$\% \text{ Remoción y/o adsorción} = 100 - \frac{C_f * 100}{c_i}$$

Fuente: Anónimo.

Donde:

C_f: Concentración final (ppm).

C_i: Concentración inicial (ppm).

2.3 ETAPA 2: FOTORREACTOR A ESCALA LABORATORIO MONITOREADO POR ARDUINO

El fotorreactor utilizado en esta etapa posee un volumen de 456 mL, la operación del fotorreactor utilizado en la etapa 2, fue por lotes, lo que indica que una vez el AM llegó a su menor concentración pasados 60 minutos, se cargó el fotorreactor con una nueva solución de AM. En esta etapa, se monitoreó la señal otorgada por el sensor respecto al tiempo.

2.3.1 Estructura interna del reactor. La parte interna del reactor consta de un tubo de acrílico transparente de 5 cm de diámetro externo, 4 mm de espesor y 30 cm de largo, para encontrar el diámetro interno del fotorreactor se utilizó un LED de chorro color rojo y una hoja blanca, en donde, el diámetro sería la mayor distancia a la que se podría visualizar la luz sin que esta se distorsionara.

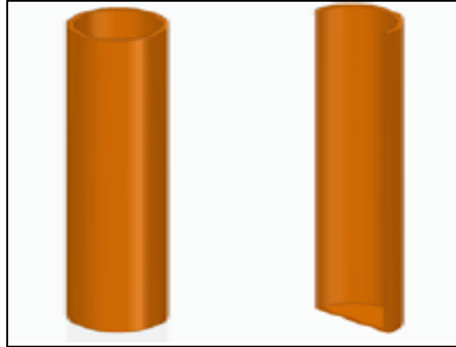
El largo del fotorreactor fue definido debido a que a esa longitud serían necesarias solo dos mangueras de aireación, las cuales proporcionarían burbujeo continuo dentro del reactor, dicho burbujeo fue proporcionado mediante dos bombas de pecera, las cuales fueron ubicadas donde se situaron los discos 1 y 2, siendo 1 el disco más cercano a la parte inferior del reactor, garantizando un flujo turbulento dentro del fotorreactor.

En la parte inferior externa del tubo se encuentra el sensor de luz Adafruit TSL 2591, el cual midió la intensidad de luz proveniente del LED de chorro rojo, este LED fue elegido debido a que cuando el color absorbido es rojo, el color transmitido u observado es azul, se eligió un LED de chorro debido a que este no distorsiona la luz, esta luz roja se irradió a través de la muestra de AM que se encontraba dentro del tubo, la aireación ingresa por la parte superior del tubo con el fin de que el burbujeo no altere la medición obtenida por el sensor.

Para tener un valor de referencia, fue necesario medir la señal otorgada por el sensor, cuando dentro de la estructura interna del fotorreactor se encontraba agua

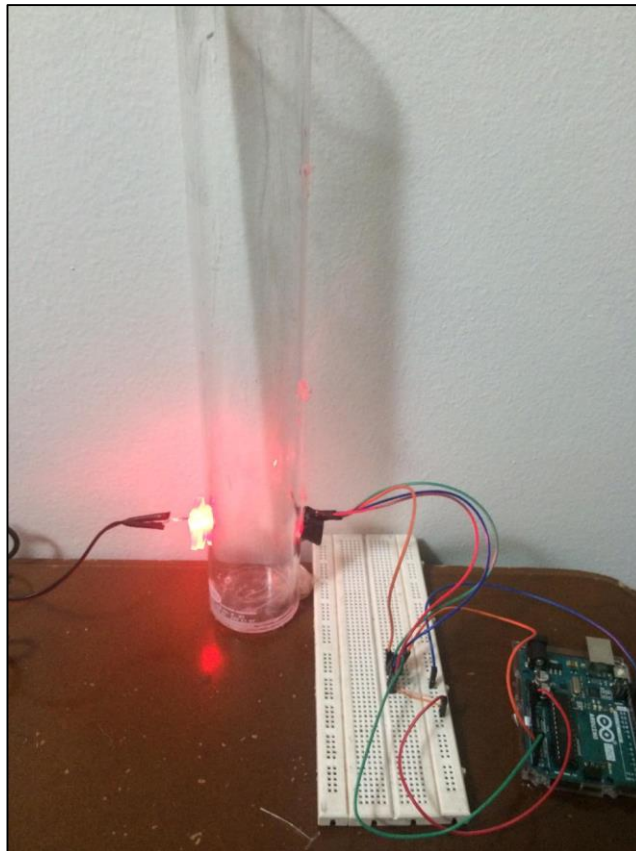
desionizada, es decir, el blanco, de esta manera se podría conocer cuando la concentración del AM dentro del fotorreactor fuera cercana a la del blanco.

Ilustración 9. Estructura interna del reactor.



Fuente: Elaboración Autores.

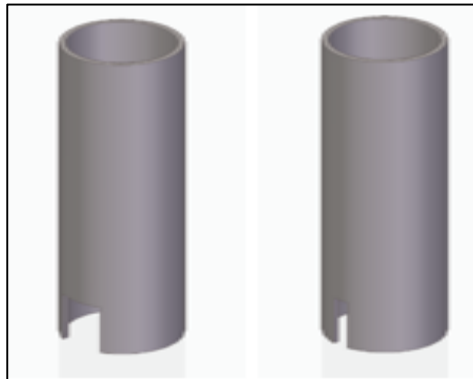
Ilustración 10. Vista interna del fotorreactor.



Fuente: Elaboración Autores.

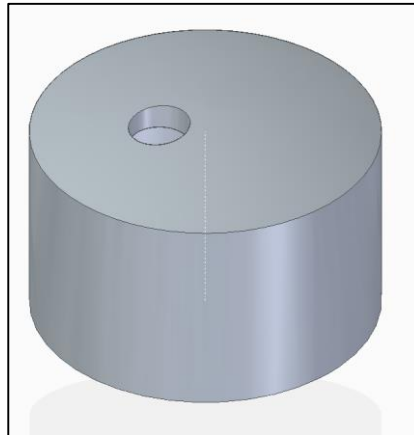
2.3.2 Estructura externa del reactor. Esta estructura está hecha de un tubo PVC de 7,2 cm de diámetro externo, 4 mm de espesor y 32 cm de largo, cuenta con dos aberturas en la parte inferior, una de 1,1 cm de ancho, donde el LED de chorro va ubicado; y, otra abertura de 3 cm, donde va ubicado el sensor de luz. Al interior del tubo, se encuentran dos cintas LED de luz blanca que irradian el tubo interno para que se lleve a cabo la fotocatalisis. El tubo cuenta con dos tapones en sus extremos, en el tapón inferior se encuentra adherido a la parte inferior del tubo interno para garantizar el soporte del fotorreactor, y en el tapón superior cuenta con un orificio por donde sale el cableado de las cintas LED y las mangueras de la aireación.

Ilustración 11. Tubo externo del reactor.



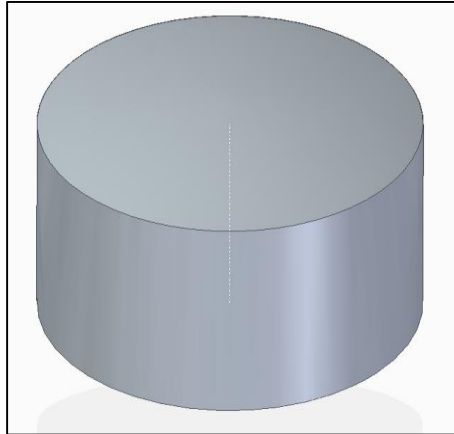
Fuente: Elaboración Autores.

Ilustración 12. Tapa superior.



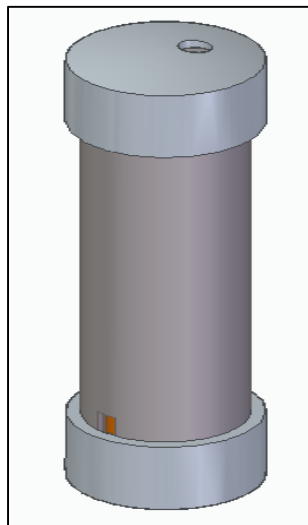
Fuente: Elaboración Autores.

Ilustración 13. Tapa inferior.



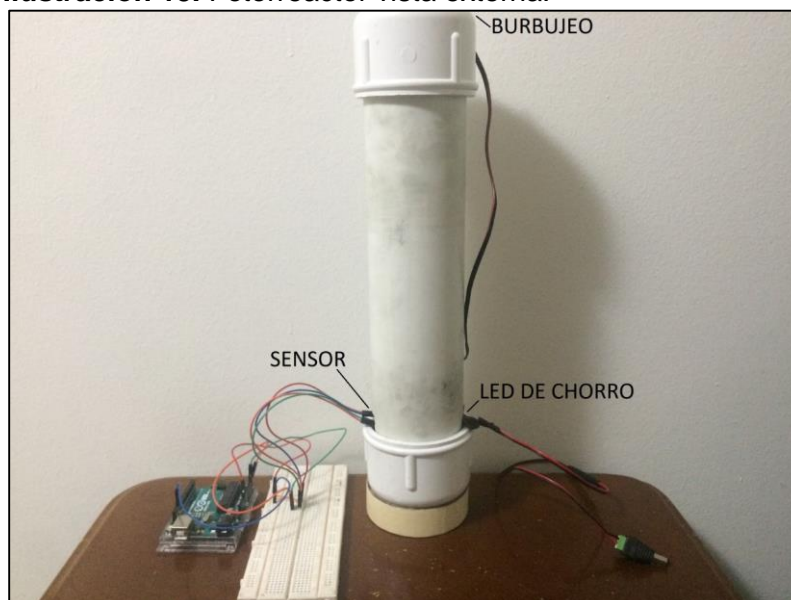
Fuente: Elaboración Autores.

Ilustración 14. Estructura externa del reactor.



Fuente: Elaboración Autores.

Ilustración 15. Fotorreactor vista externa.



Fuente: Elaboración Autores.

2.3.3 Discos de la mezcla fotocatalítica para la etapa 2. Una vez conocido el comportamiento de los discos de prueba, se procede a preparar los discos que serán usados en el fotorreactor, teniendo en cuenta que el diámetro externo de los discos con junta tórica (o-ring) es de 4,6 cm.

En la **Tabla 5**, se pueden evidenciar los porcentajes de I y AC al lado izquierdo, mientras que al lado derecho se encuentran estos porcentajes traducidos a peso, en donde el peso total de cada disco es de 2 g con las composiciones mostradas y se realizaron 3 discos por cada proporción.

Tabla 5. Composición de la mezcla fotocatalítica en los discos empleados en el fotorreactor de 456 mL.

%I	%AC	I (g)	AC (g)
10	90	0,2	1,8
30	70	0,6	1,4
50	50	1	1
70	30	1,4	0,6
90	10	1,8	0,2

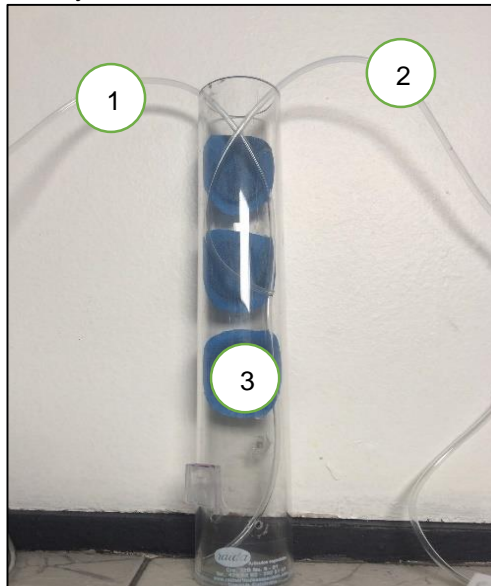
Fuente: Elaboración Autores.

Los discos fueron elaborados a partir de tela quirúrgica y o-rings, tal como se muestra en la **Ilustración 6**, estos se utilizaron cuatro veces para la remoción de una solución de AM con una concentración de 5 ppm.

2.3.3.1 Preparación de los discos I/AC. La preparación de los discos con la mezcla fotocatalítica, se realizó llevando a cabo el esquema presentado en la **Ilustración 7**, teniendo en cuenta que dentro de los discos no debía ser añadida la I primero, ya que esta podría quedar atrapada entre el o-ring y la tela, lo cual impediría una buena homogenización de la mezcla fotocatalítica.

La **Ilustración 16**, muestra la disposición de los discos y el burbujeo dentro del fotorreactor de 456 mL, en donde **1 y 2**, son mangueras por las cuales ingresa el burbujeo al fotorreactor, **1**, llega hasta el fondo del fotorreactor y **2** hasta la mitad del mismo, esto con el fin de mezclar la I y el AC, **3**, son discos que contienen la mezcla fotocatalítica explicados en la sección 2.3.3.

Ilustración 16. Disposición de discos y burbujeo.



Fuente: Elaboración Autores.

2.3.4 Seguimiento muestral. El seguimiento de las reacciones fotocatalíticas puede realizarse por medio de sistemas de monitoreo que están compuestos por un sensor, una interfaz de adquisición de datos y un software. La variable monitoreada fue la señal en unidades de lux durante un tiempo de 60 minutos.

2.3.4.1 Tarjeta de adquisición de datos. Las características que debe tener una tarjeta de adquisición de datos son: número de canales analógicos, velocidad de muestreo, resolución, forma de comunicarse con el computador, entre otros.

Tabla 6. Comparación entre las tarjetas de adquisición de datos.

	Arduino UNO R3 ⁴³	myDAQ ⁴⁴
Resolución (dígitos)	4	5,5
Número de canales analógicos	6	16
Comunicación al computador	USB	USB
Costos (COP)	94560	2000000

Fuente: Elaboración Autores.

Tal como se evidencia en la **Tabla 6**, la tarjeta de adquisición MyDAQ es mucho mejor que la Arduino UNO R3, siendo superior en la mayoría de los aspectos evaluados, sin embargo, un factor importante a la hora de construir un fotorreactor y procurar que el mismo sea una opción económica son los costos y este es el único aspecto en contra de la MyDAQ, lo cual hace que la tarjeta Arduino UNO R3, sea una alternativa económica que presenta una buena resolución, número de canales analógicos y datos confiables.

Ilustración 17. Tarjeta Arduino Uno R3.



Fuente: Sigma Electrónica. Arduino Uno R3. Disponible en: <https://www.sigmaelectronica.net/producto/a000066/>

2.3.4.2 Sensor de luz. Se utilizó un sensor de luz, debido a que era necesario obtener los datos de la señal a diferentes tiempos durante 60 minutos, con el fin de conocer cuando la concentración de AM fuera la menor posible ya que la señal otorgada por el sensor sería cercana a la señal generada por el blanco.

⁴³ Sigma Electronica. Arduino Uno R3. [Consultado el 4 de octubre de 2018]. Disponible en : <https://www.sigmaelectronica.net/producto/a000066/>

⁴⁴ National Instruments. User Guide myDAQ. [Consultado el 28 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373060g.pdf>

Las características que debe tener un sensor de luz son; sensibilidad a bajas condiciones de luz, rango de luz, rango de voltaje, entre otras.

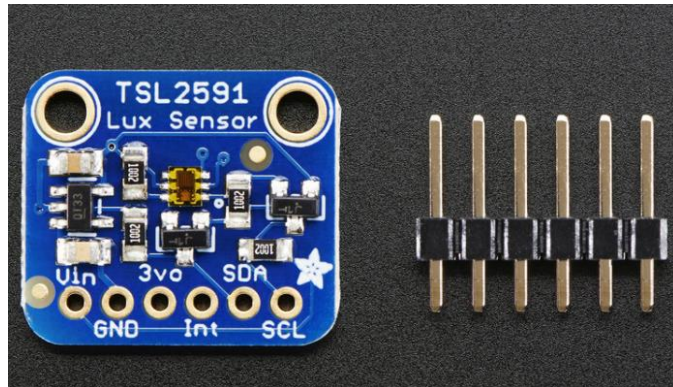
En la **Tabla 7**, se evidencia que el sensor TSL 2591, es con el cual se puede medir un rango de luz de hasta 88000 lux⁴⁵, el cual es un valor mayor al que se puede obtener mediante el uso de los otros dos sensores, asimismo, este sensor tiene un rango de hasta 5 V, de hecho, en la ficha técnica el fabricante se atreve a comparar la sensibilidad de este sensor con el ojo humano, es por este motivo que a pesar de que su costo es superior al de los sensores TSL 2560 y TSL 2561, el sensor TSL 2591 será utilizado en el presente proyecto.

Tabla 7. Comparación de sensores de luz visible compatibles con Arduino.

	TSL 2591 ⁴⁶	TSL 2560 ⁴⁷	TSL 2561 ⁴⁸
Máximo rango de luz (lux)	88000	10000	40000
Rango de voltaje (V)	3,3 – 5	2,7 – 3,6	2,7 – 3,6
Rango de temperatura (°C)	-30 a 80	-30 a 80	-30 a 80
Costos (COP)	34000	16456	13000

Fuente: Elaboración Autores.

Ilustración 18. Sensor de luz TSL 2591.



Fuente: ADA,Lady. Adafuit TSL 2591 High Dynamic Range Digital Light Sensor. 2011. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-tsl2591/overview>

⁴⁵ ADA, Lady. Adafuit TSL 2591 High Dynamic Range Digital Light Sensor. [Consultado 14 de julio de 2018].]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-tsl2591/overview>

⁴⁶ ADA, Lady. Op. cit., p.1.

⁴⁷ TAOS. TSL 2560, TSL 2561. [Consultado el 15 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>

⁴⁸ Ibid. p. 7.

2.3.4.3 Conexión Arduino Uno R3 y sensor. Se procedió a conectar los puertos de la siguiente manera:

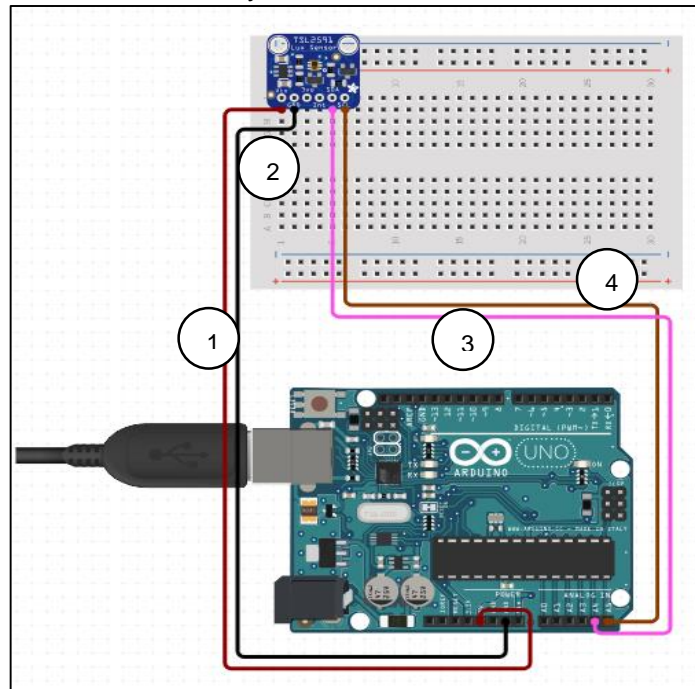
Las conexiones mencionadas en la **Tabla 8**, se pueden observar con mayor claridad en la **Ilustración 20**, los pines (1) VIN y (2) GND del sensor, son aquellos que ayudan a proporcionar energía, esto con el fin de permitir el flujo de energía entre el sensor y la tarjeta Arduino, por otro lado, los pines (3) SDA y (4) SCL, son pines lógicos de datos y tiempo respectivamente⁴⁹.

Tabla 8. Conexiones Arduino y sensor de luz⁵⁰.

ARDUINO		SENSOR
1. 5V	→	VIN
2. GND	→	GND
3. A4	→	SDA
4. A5	→	SCL

Fuente: HOW TO CONNECT ARDUINO UNO TO LUX SENSOR; Disponible en: <https://www.circuito.io/app?components=512,11021,44359>

Ilustración 19. Conexión entre tarjeta Arduino UNO R3 y sensor TSL 2591.



Fuente: HOW TO CONNECT ARDUINO UNO TO LUX SENSOR; Disponible en: <https://www.circuito.io/app?components=512,11021,44359>

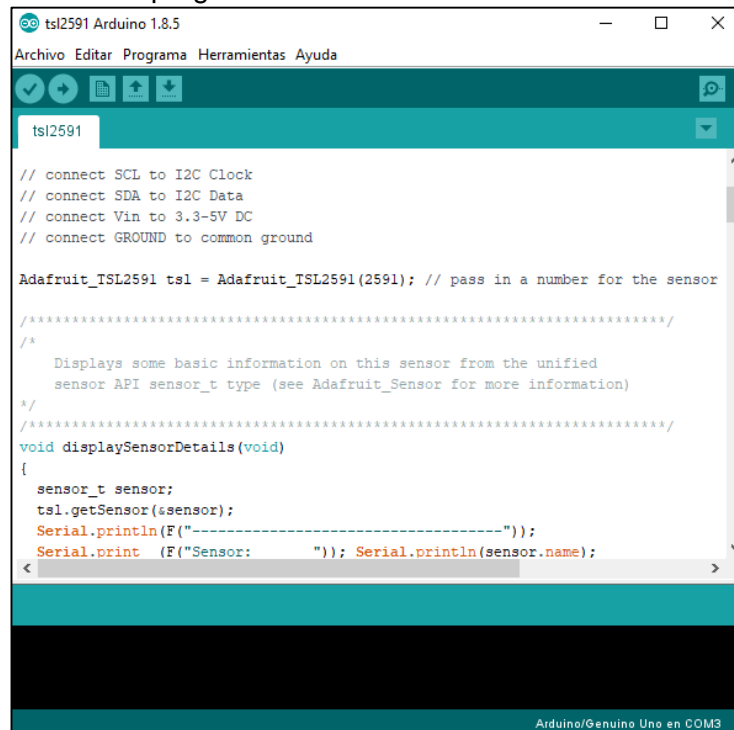
⁴⁹ ADA, Lady. Pinouts. Jul 11, 2014. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-tsl2591/pinouts>

⁵⁰ HOW TO CONNECT ARDUINO UNO TO LUX SENSOR; Disponible en: <https://www.circuito.io/app?components=512,11021,44359>

2.3.4.4 Software de control. El funcionamiento de la tarjeta Arduino, se garantiza mediante la descarga del programa “ARDUINO” creado por la empresa que lleva el mismo nombre, dicho programa es de acceso libre y gratuito para todos los usuarios, además está disponible en varias versiones, para la ejecución del proyecto se utilizó la versión 1.8.5, ya que fue la primera versión para descargar que arrojó la página. Además, la tarjeta posee una entrada USB la cual se puede conectar directamente a cualquier computador.

Al ser el fabricante del sensor la empresa ADAFRUIT, un proveedor de la empresa ARDUINO, ya existe una programación que permite visualizar los valores de luminosidad entregados por el sensor, como se puede apreciar en la **Ilustración 20**.

Ilustración 20. Parte de la programación del sensor TSL 2591 en el programa Arduino version 1.8.5.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The title bar reads "tsl2591 Arduino 1.8.5". The menu bar includes "Archivo", "Editar", "Programa", "Herramientas", and "Ayuda". Below the menu bar is a toolbar with icons for saving, running, and other functions. The main editor area contains C++ code for the TSL2591 sensor. The code includes comments for pin connections, an initialization line for the sensor object, a multi-line comment describing the display function, and the implementation of the display function which uses Serial.print and Serial.println to output sensor data. The status bar at the bottom indicates "Arduino/Genuino Uno en COM3".

```
tsl2591

// connect SCL to I2C Clock
// connect SDA to I2C Data
// connect Vin to 3.3-5V DC
// connect GROUND to common ground

Adafruit_TSL2591 tsl = Adafruit_TSL2591(2591); // pass in a number for the sensor

/*****
 *
 * Displays some basic information on this sensor from the unified
 * sensor API sensor_t type (see Adafruit_Sensor for more information)
 */
/*****/
void displaySensorDetails(void)
{
  sensor_t sensor;
  tsl.getSensor(&sensor);
  Serial.println(F("-----"));
  Serial.print (F("Sensor:      ")); Serial.println(sensor.name);
```

Fuente: Programa Arduino versión 1.8.5.

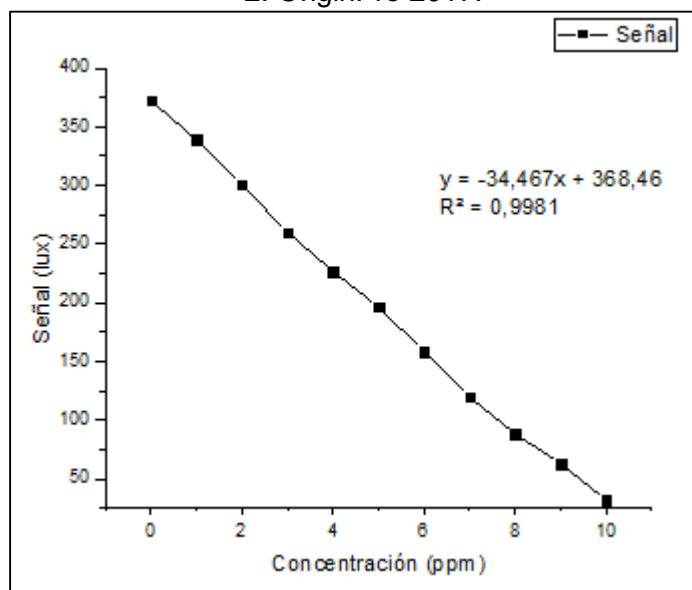
2.3.5 Curva de calibración reactor. Se realiza el mismo procedimiento del numeral 2.1, midiendo con el sensor TSL 2591 una señal de luz (dada en Lux) para relacionarla con la concentración.

Tabla 9. Datos de concentraciones y señales de luz para la curva de calibración del AM.

Concentraciones (ppm)	Señal (lux)
0	372,39
1	339,04
2	300,65
3	260,06
4	226,97
5	196,46
6	158,47
7	119,81
8	88,5
9	62,89
10	32,13

Fuente: Elaboración Autores.

Gráfica 2. Curva de calibración para el AM de la etapa 2. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

Para calcular el porcentaje de remoción y/o adsorción de AM, se utiliza la **Ecuación 1**.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo, se muestran y analizan los resultados obtenidos experimentalmente.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA

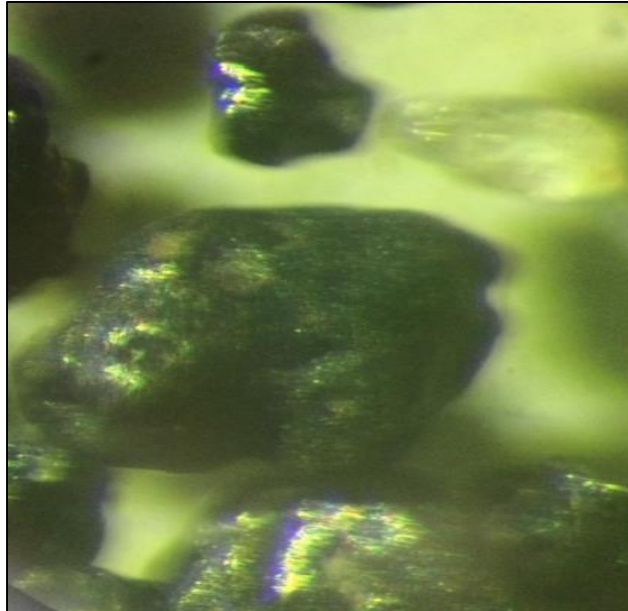
3.1.1 Caracterización morfológica. Se caracterizaron tres muestras: 100% I, 100% AC y la mezcla de 50% I - 50% AC, por microscopía óptica con un microscopio marca Olympus PM3 y un aumento de 200X, con el fin de observar si la I y el AC se mezclaron correctamente. En las Ilustraciones **21**, **22** y **23** se observa el AC en polvo, la ilmenita y la mezcla, respectivamente.

Ilustración 21. Vista AC en polvo en el microscopio óptico.



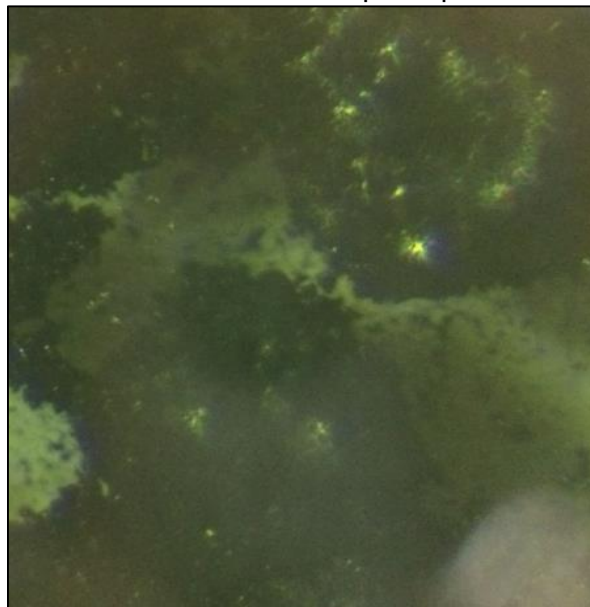
Fuente: Elaboración Autores.

Ilustración 22. Vista I en el microscópico óptico.



Fuente: Elaboración Autores.

Ilustración 23. Vista de la mezcla fotocatalítica en el microscópico óptico.



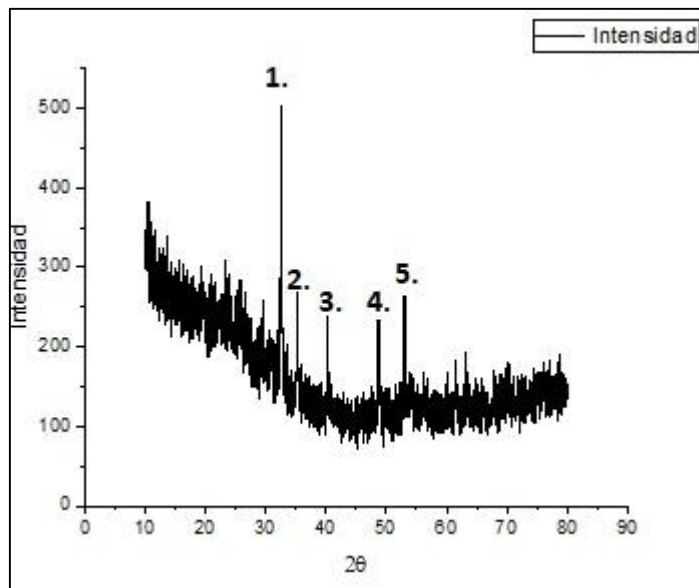
Fuente: Elaboración Autores.

Se pudo observar con la **Ilustración 17** que el AC cubre los granos de I en su mayoría, esto favorece la remoción del AM porque el AC actúa como una especie

de catalizador que ayuda a la I a que “rompa” más moléculas de AM y se puedan obtener mejores resultados en las remociones⁵¹.

3.1.2 Caracterización estructural. Se realizó una difracción de rayos X en un difractómetro Shimadzu XRD-6000, en donde se observaron los siguientes difractogramas.

Gráfica 3. Caracterización estructural de I. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

Observando la **Gráfica 3**, el pico **1**, es compatible con la estructura de la ilmenita, este pico indica que se tiene una composición mayoritaria de FeTiO_3 ⁵², al igual que los picos **3** y **4**. El pico **2**, indica que la ilmenita caracterizada también tiene en su estructura TiO_2 en fase rutilo⁵³, al igual que el pico **5** que se encuentra por encima de los 50° .

Para el carbón activado, no se realiza una difracción de rayos X debido a que este componente es amorfo, por lo cual no muestra ningún pico en el cual se pueda observar su estructura⁵⁴.

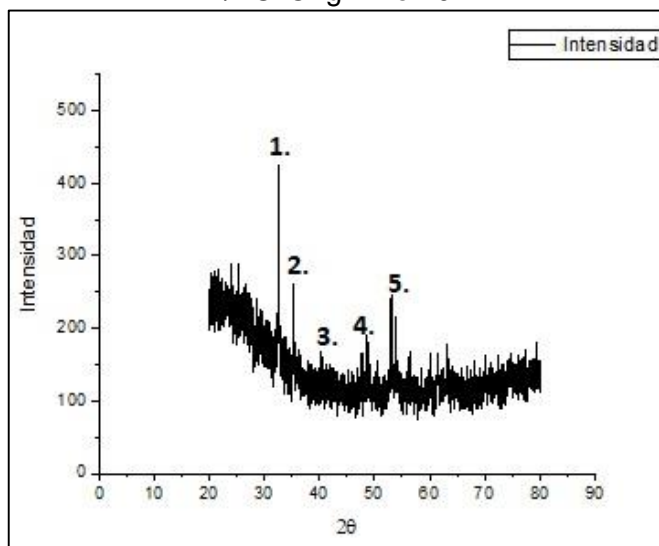
⁵¹ MURILLO, Herman. Obtención de un compuesto de dióxido de titanio y carbón activado aplicado a la oxidación fotocatalítica del ión cianuro. Escuela Politécnica Nacional, 2015. p. 9

⁵² YAMAGUCHI, D.; TANG, L.; CHIANG, K. Pre-oxidation of natural ilmenite for use as an oxygen carrier in the cyclic methane-steam redox process for hydrogen production. En: Chemical Engineering Journal. 2017

⁵³ LEE, R.; JUAN, J.; LAI, C.; LEE, K. Ilmenite: Properties and photodegradation kinetic on Reactive Black 5 dye. En: Chinese Chemical Letters. 2017.

⁵⁴ GOU, H.; XHANG, G.; HU, X.; CHOU, K. Kinetic study on carbothermic reduction of ilmenite with activated carbon. 2012. p. 1856-1851.

Gráfica 4. Caracterización estructural de la mezcla I/AC. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 4**, se tiene el difractograma para la mezcla entre I y AC, en este se observa que la intensidad no es igual al de la **Gráfica 3**, debido que, al estar mezclado con el AC y al este ser amorfo, no permite que el rayo pase con igual intensidad al rayo que pasó por la muestra de I. Los picos no varían en composición, por lo que también se tiene FeTiO_3 y TiO_2 en fase rutilo.

3.2 EVALUACIÓN ETAPA 1

Para la evaluación de la etapa 1, fue necesario el uso del fotorreactor de 25 mL y los discos de prueba con las composiciones mostradas en la **Tabla 8**.

Todos los análisis de los porcentajes de remoción se hicieron para lapsos de 60 minutos, evaluando las concentraciones a la salida del fotorreactor. Los porcentajes de remoción obtenidos por medio de la **Ecuación 1**, se evidencian en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Porcentajes de remoción obtenidos en la etapa 1.

	Porcentajes de Remoción (%)			
	U1	U2	U3	U4
10% I - 90% AC	29,5	50,9	82,3	52,8
30% I - 70% AC	69,0	84,8	43,6	75,4
50% I - 50% AC	32,5	82,6	90,4	83,8
70% I - 30% AC	67,4	61,0	85,4	72,9
90% I - 10% AC	16,0	33,0	89,2	25,3

Fuente: Elaboración Autores.

En la **Tabla 10**, se evidencia que las muestras en las que se obtienen mayores porcentajes de remoción en la mayoría de los usos son 30% I - 70% AC, 50% I – 50% AC, 70% I – 30% AC.

Para cuantificar las veces que un uso, bien sea U1, U2, U3 o U4, es mayor que los demás, se procede a utilizar la siguiente **Ecuación 2**:

Ecuación 2. Número de veces que un uso es más alto respecto a otro.

$$No\ de\ veces_i = \frac{\%U_i\ mas\ alto}{\%U_i}$$

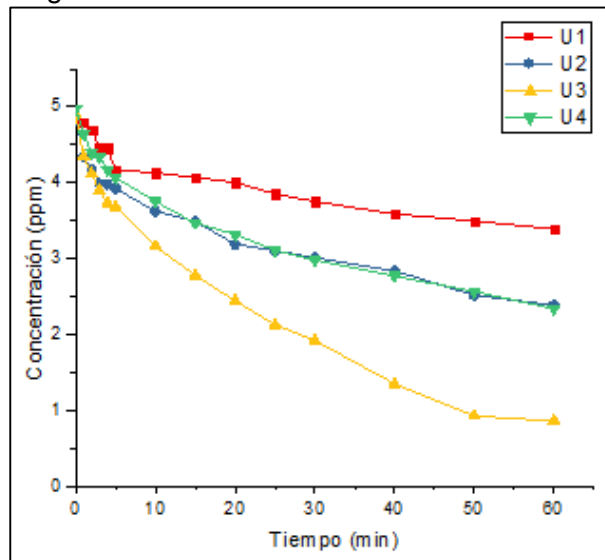
Fuente: Anónimo.

Donde:

$\%U_i\ mas\ alto$: porcentaje de remoción más alto para el disco con composición i.

$\%U_i$: porcentaje de remoción para el disco i.

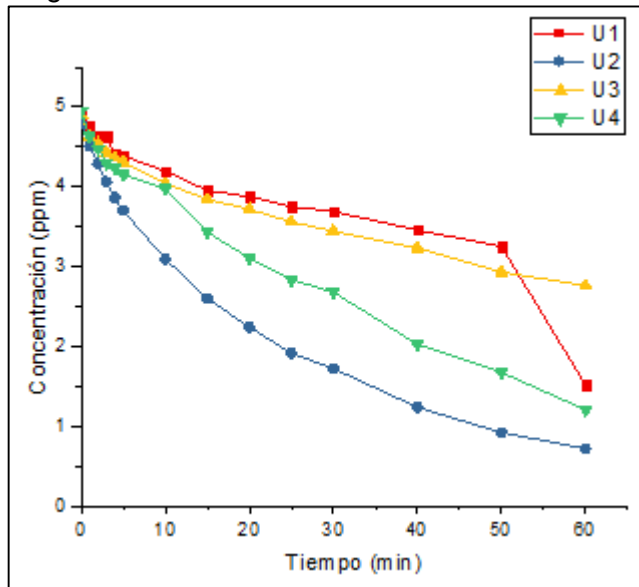
Gráfica 5. Usos del disco 10% I – 90% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 5**, se puede evidenciar que U3 es mayor que U1, U2 y U4, lo anterior se puede cuantificar a partir de los porcentajes de remoción presentes en la **Tabla 10** y al emplear la **Ecuación 2**, por lo tanto, U3 es 2,79 veces mayor que U1, 1,62 veces mayor que U2 y 1,56 veces mayor que U4.

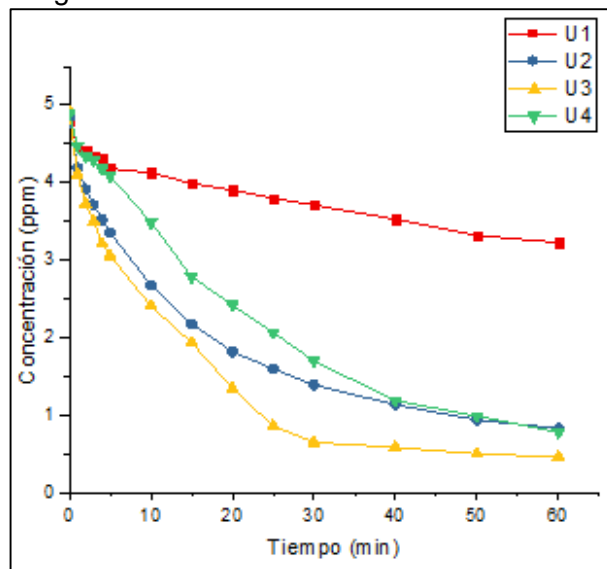
Gráfica 6. Usos del disco 30% I – 70% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 6**, se puede evidenciar que U2 es mayor que U1, U3 y U4, lo anterior se puede cuantificar a partir de los porcentajes de remoción presentes en la **Tabla 10** y al emplear la **Ecuación 2**, por lo tanto, U2 es 1,23 veces mayor que U1, 1,94 veces mayor que U3 y 1,12 veces mayor que U4.

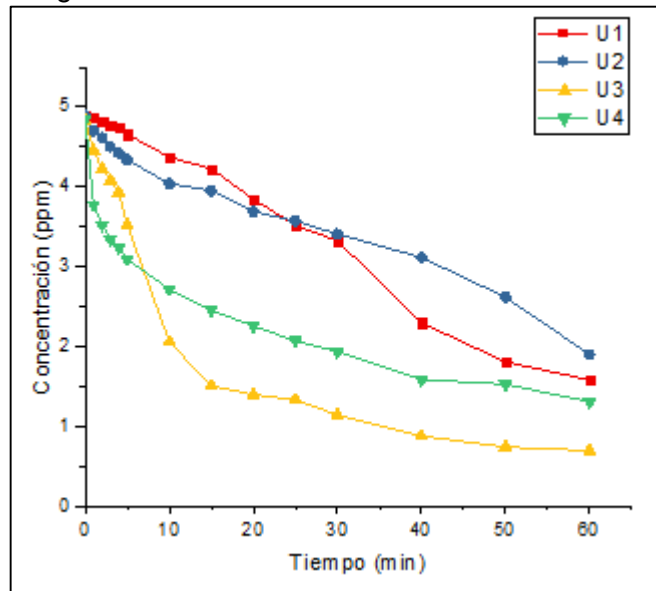
Gráfica 7. Usos del disco 50% I – 50% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 7**, se puede evidenciar que U3 es mayor que U1, U2 y U4, lo anterior se puede cuantificar a partir de los porcentajes de remoción presentes en la **Tabla 10** y al emplear la **Ecuación 2**, por lo tanto, U3 es 2,78 veces mayor que U1, 1,09 veces mayor que U2 y 1,08 veces mayor que U4.

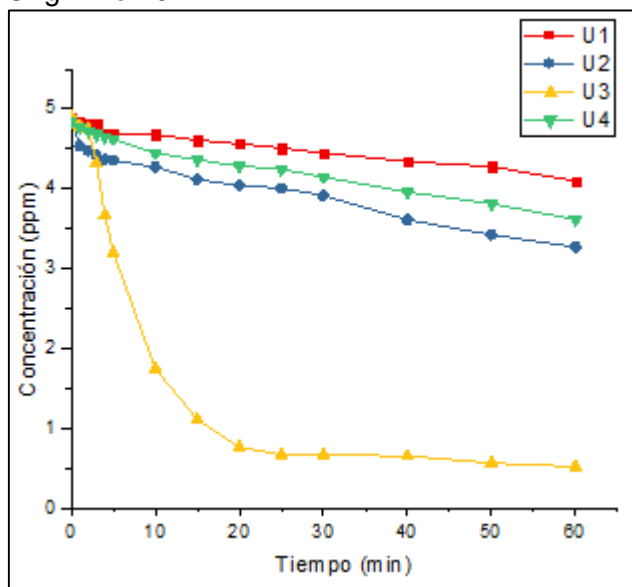
Gráfica 8. Usos del disco 70% I – 30% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 8**, se puede evidenciar que U3 es mayor que U1, U2 y U4, lo anterior se puede cuantificar a partir de los porcentajes de remoción presentes en la **Tabla 10** y al emplear la **Ecuación 2**, por lo tanto, U3 es 1,26 veces mayor que U1, 1,4 veces mayor que U2 y 1,17 veces mayor que U4.

Gráfica 9. Usos del disco 90% I – 10% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 1. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

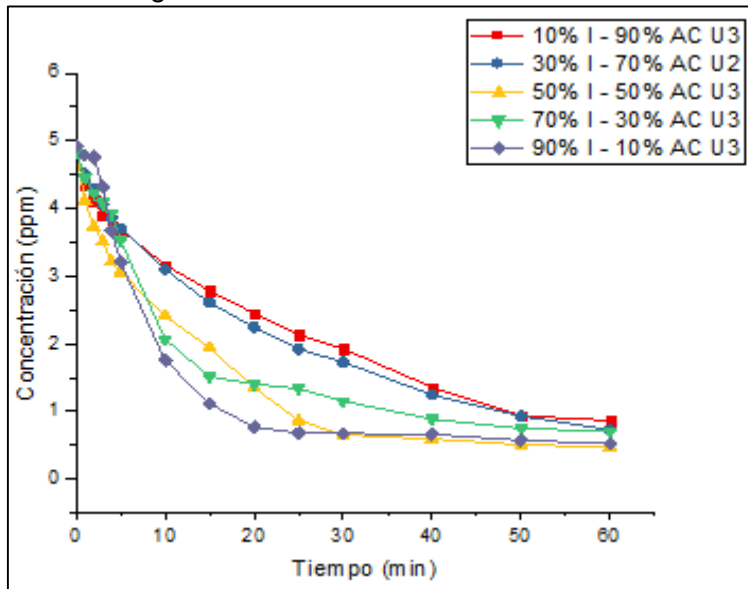
En la **Gráfica 9**, se puede evidenciar que U3 es mayor que U1, U2 y U4, lo anterior se puede cuantificar a partir de los porcentajes de remoción presentes en la **Tabla 10** y al emplear la **Ecuación 2**, por lo tanto, U3 es 5,58 veces mayor que U1, 2,7 veces mayor que U2 y 3,52 veces mayor que U4.

Tabla 11. Composiciones y mayor porcentaje de remoción de AM en la etapa 1.

Composición	Mayor porcentaje de remoción
10% I – 90% AC	82
30% I – 70% AC	85
50% I – 50% AC	90
70% I – 30% AC	85
90% I – 10% AC	89

Fuente: Elaboración Autores.

Gráfica 10. Usos en los cuales se obtienen los mayores porcentajes de remoción de AM para los diferentes discos. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

La **Tabla 11**, fue obtenida a partir de los mayores porcentajes de remoción presentes **Tabla 10**, a pesar de que en la **Tabla 10** se evidencia que el disco de composición 90% I – 10% AC logra una remoción similar a la obtenida con el disco 50% I – 50% AC, en este último se evidencian mayores porcentajes de remoción en U1, U2, U3, U4.

En la **Tabla 11**, se observa que el porcentaje de remoción para los discos de composición 10% I – 90% AC y 70% I – 30% AC parece ser iguales, de hecho, al revisar la **Tabla 10**, los porcentajes de remoción que se obtienen son cercanos, sin embargo, también en la **Tabla 10** es posible notar que los porcentajes de remoción obtenidos por el disco cuya mezcla era 70% I – 30% AC son mayores, lo cual genera una ventaja en esta última mezcla si fuera necesario elegir entre estas dos.

Los discos que estaban compuestos por 10% I – 90% AC y 90% I – 10% AC, a pesar de que en U3 presentan su mayor porcentaje de remoción permiten evidenciar que al ser discos con una composición muy alta de un componente y con una composición muy baja del otro, es necesario el uso de cantidades más equilibradas de los compuestos con el fin de obtener un mejor funcionamiento de la mezcla fotocatalítica.

En la **Gráfica 10**, se puede evidenciar que el disco cuya composición era 50% I – 50% AC, es el que genera más consistentes y mayores porcentajes de remoción, el segundo mejor es el disco de composición 70% I – 30% AC.

En lo anterior se evidencia una activación del catalizador, lo cual permitió obtener altos porcentajes de remoción cuando se utilizaron los discos con 30% I – 70% AC, 50% I – 50% AC y 70% I – 30% AC.

3.3 EVALUACIÓN ETAPA 2

Para la evaluación de la etapa 2, fue necesario el uso del fotorreactor de 456 mL y 3 discos de prueba con las composiciones mostradas en la **Tabla 9**.

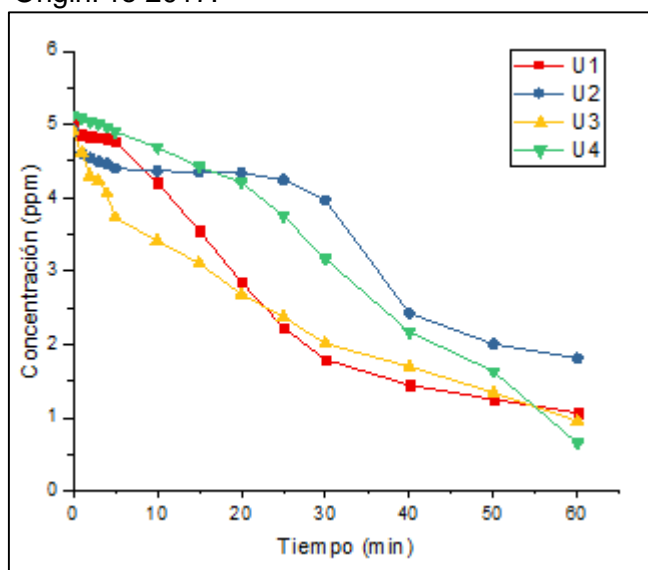
Todos los análisis de los porcentajes de remoción se harán para lapsos de 60 minutos, evaluando las concentraciones a la salida del fotorreactor. Los porcentajes de remoción obtenidos por medio de la **Ecuación 1**, se evidencian en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Porcentajes de remoción de AM obtenidos en la etapa 2.

	Porcentajes de Remoción (%)			
	U1	U2	U3	U4
10% I - 90% AC	78,7	63,2	80,5	87,3
30% I - 70% AC	79,9	75,7	69,7	56,6
50% I - 50% AC	94,8	88,0	89,4	93,7
70% I - 30% AC	21,9	83,0	66,8	76,8
90% I – 10% AC	85,7	80,9	83,2	66,6

Fuente: Elaboración Autores.

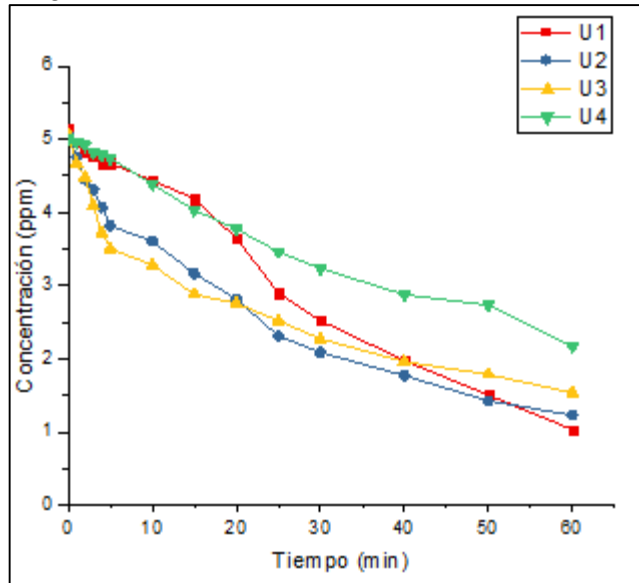
Gráfica 11. Usos del disco 10% I – 90% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 11**, se evidencia que U4 obtuvo el porcentaje de remoción más alto, siendo este 87,3%, superando en 1,11 veces la remoción de U1, en 1,38 veces la remoción de U2 y en 1,08 veces la remoción de U3.

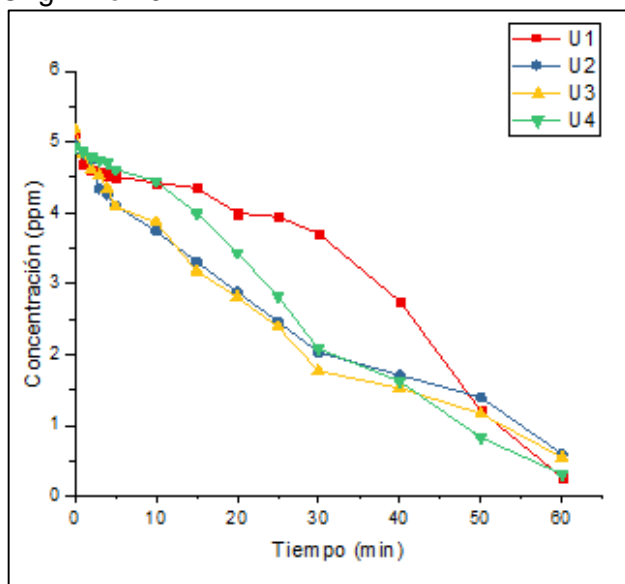
Gráfica 12. Usos del disco 30% I – 70% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 12**, se obtuvo una remoción de 79,9% en U1, siendo este el mayor porcentaje de remoción que se observó con la composición 30% I – 70% AC, en U2, U3 y U4 hubo una disminución en 1,06, 1,15 y 1,41, respectivamente.

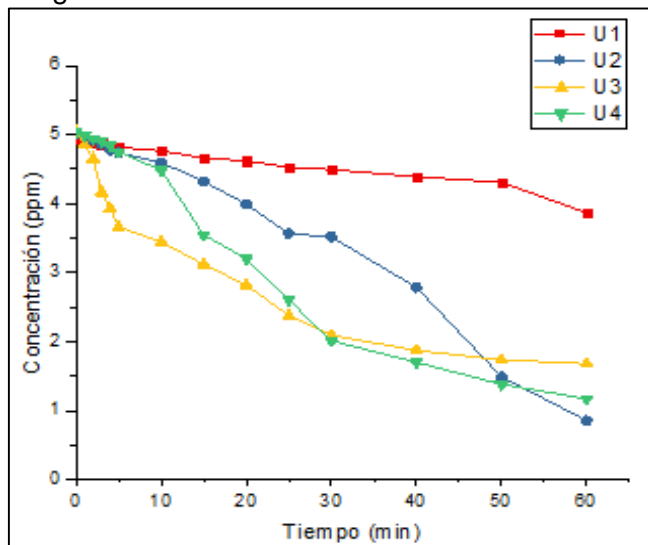
Gráfica 13. Usos del disco 50% I – 50% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 13**, se observa que U1 y U4 terminan, en el minuto 60, con un porcentaje de remoción muy cercano, 94,8% y 93,7%, respectivamente. Siendo U1 la que más contaminante removió, se tiene que es mayor en 1,08 veces la remoción de U2 y 1,06 veces la remoción de U3.

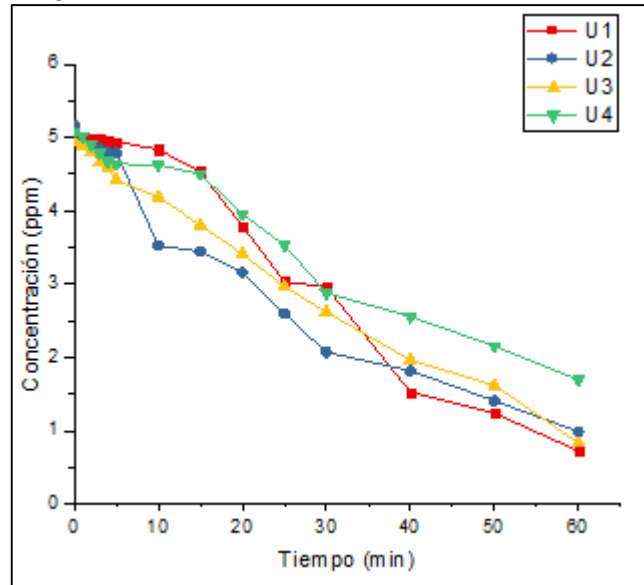
Gráfica 14. Usos del disco 70% I – 30% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 14**, se puede observar que la mejor remoción obtenida fue en U2 con un porcentaje de 83%, siendo 3,79 veces mayor que la remoción en U1, 1,24 veces mayor que la remoción en U3 y 1,08 veces mayor que la remoción en U4

Gráfica 15. Usos del disco 90% I – 10% AC evaluados en un tiempo de 60 minutos Etapa 2. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 15**, se evidencia que la menor remoción obtenida fue en U4, con un porcentaje de remoción de 66,6%; y la mayor remoción obtenida fue con U1, siendo esta 1,29 veces mayor que U4.

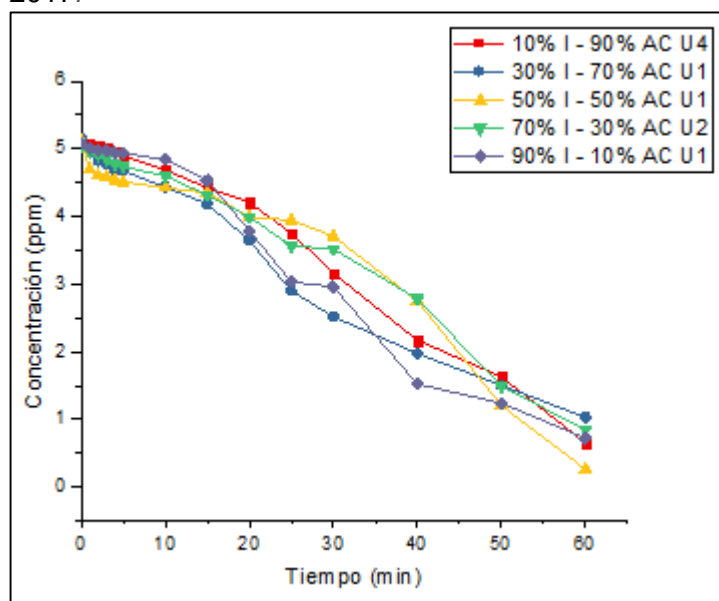
Al aplicar la **Ecuación 1**, es posible obtener los porcentajes de remoción de AM en el fotorreactor de 456 mL y estos se evidencian en la **Tabla 12**, en donde las dos composiciones que presentaron el mayor porcentaje de remoción de AM fueron las que contenían 50% I – 50% AC y 10% I - 90% AC.

Tabla 13. Composiciones y mayor porcentaje de remoción de AM en la etapa 2.

Composición	Mayor porcentaje de remoción de AM
10% I - 90% AC	87,3
30% I - 70% AC	79,9
50% I - 50% AC	94,8
70% I - 30% AC	83,0
90% I - 10% AC	85,7

Fuente: Elaboración Autores.

Gráfica 16. Usos en los que se obtuvo el mayor porcentaje de remoción de AM en la etapa 2. OriginPro 2017.



Fuente: Elaboración Autores.

En la **Gráfica 16**, es posible observar que en los discos que estaban compuestos por 50% I - 50% AC el porcentaje de remoción fue mayor a los otros, siendo este de casi un 95%.

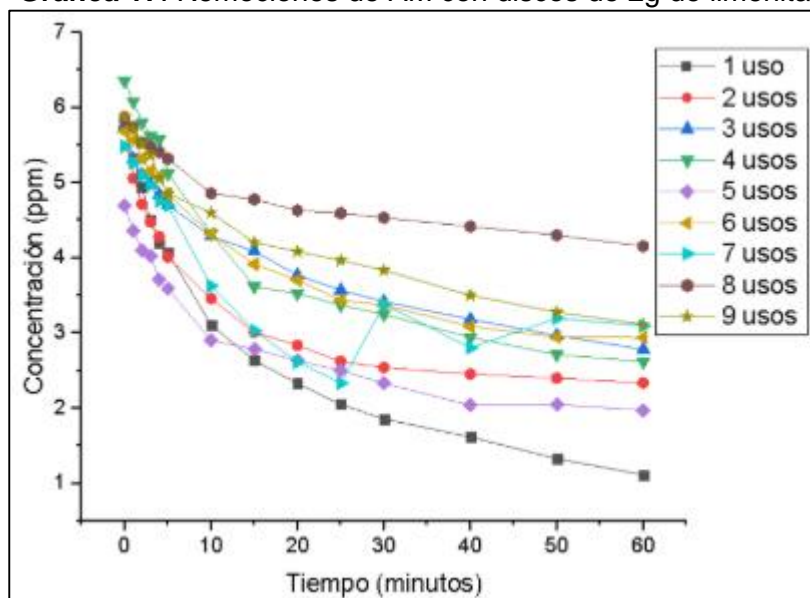
A pesar de que los discos cuya composición era de 10% I – 90% AC presentaron el segundo mejor porcentaje de remoción, al observar la **Tabla 12**, los porcentajes de remoción para los diferentes usos fueron menores en comparación a los obtenidos con los discos con las demás composiciones.

Los discos cuya composición era 10% I – 90% AC, presentaron menores porcentajes de remoción al comparar los resultados obtenidos en la **Tabla 13** con los resultados de la **Tabla 10**, en donde en esta última, el porcentaje de remoción para cada uno de los usos fue el segundo mejor obtenido en el fotorreactor de 25 mL.

Los discos con composición 50% I – 50% AC, tanto en la **Tabla 10** como en la **13**, presentaron los mayores porcentajes de remoción al compararlos con los discos de las otras composiciones, esto indica que el utilizar la misma cantidad de I y AC proporciona un alto grado de remoción de AM (94,8%), en los discos utilizados en la etapa 2 a pesar de que el mayor porcentaje de remoción se encuentra cuando se realizó U1, se evidencia un crecimiento en el porcentaje de remoción desde U2 hasta U4, en donde en U4 se encuentra que el porcentaje de remoción es un 1% menor al obtenido en U1, esto indica que en los discos a medida que el fotocatalizador es expuesto a la luz, se presenta una activación del mismo, además, que es necesario el uso de AC e I con el fin de mejorar la remoción de AM.

Del proyecto “Construcción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita” realizado por BELTRAN Tatiana y RIVERA Cristian⁵⁵, se realizaron degradaciones de AM utilizando discos de ilmenita y haciendo 8 usos de estos, dando como resultado la siguiente gráfica para el disco de 2g de ilmenita.

Gráfica 17. Remociones de AM con discos de 2g de ilmenita.



Fuente: BELTRAN, Tatiana y RIVERA, Cristian. Construcción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita. Fundación Universidad de América, 2018. p. 65.

En la **Gráfica 17**, se observa que el primer uso tiene el mayor porcentaje de remoción de AM y a medida que aumentan los usos, este porcentaje disminuye. Caso contrario a lo sucedido con los discos de I/AC utilizados, a medida que se aumentaron los usos, el porcentaje de remoción fue mayor, en la mayoría de los casos. El porcentaje de remoción del trabajo realizado por BELTRAN y RIVERA fue de 80,7%⁵⁶, mientras que en nuestro proyecto se obtuvo un porcentaje mayor (94,8%). Esto se debe al carbón activado al ser un material con gran área superficial y extrema porosidad facilita el aumento en la velocidad de fotodegradación, permitiendo que una amplia cantidad de contaminante entre en contacto con la ilmenita a través de sus poros⁵⁷.

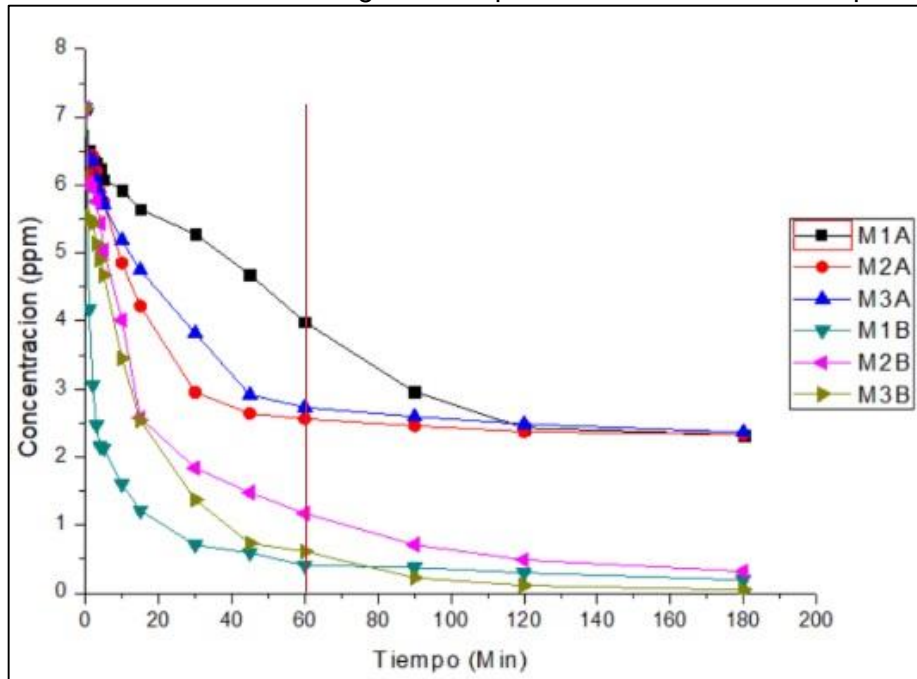
⁵⁵ BELTRAN, Tatiana and RIVERA, Cristian. Construcción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita. Fundación Universidad de América, 2018.

⁵⁶ Ibid., p. 65.

⁵⁷ MURILLO, Herman. Obtención de un compuesto de dióxido de titanio y carbón activado aplicado a la oxidación fotocatalítica del ión cianuro. Escuela Politécnica Nacional, 2015. p. 9

Del trabajo de grado “Evaluación de la actividad fotocatalítica del TiO₂ soportado en carbón activado para la degradación de azul de metileno” realizado por DIAZ David y PERDOMO Karen⁵⁸, se realizó un compuesto de dióxido de titanio y carbón activado con diferentes composiciones de dióxido de titanio y temperaturas de calcinación, obteniendo como resultado la siguiente gráfica.

Gráfica 18. Prueba fotodegradación para todas las muestras limpias.



Fuente: DIAZ, David and PERDOMO, Karen. Evaluación de la actividad fotocatalítica del TiO₂ soportado en carbón activado para la degradación de azul de metileno. Fundación Universidad de América, 2018. p. 47.

Tomando como referencia el tiempo en 60 min, el mejor porcentaje de degradación del proyecto de DIAZ y PERDOMO es de aproximadamente 95%, siendo este porcentaje similar al obtenido en el presente proyecto. Esto nos indica que sí hay una ventaja al mezclar un material para fotodegradación y un material adsorbente, a utilizar éstos por aparte.

⁵⁸ DIAZ, David and PERDOMO, Karen. Evaluación de la actividad fotocatalítica del TiO₂ soportado en carbón activado para la degradación de azul de metileno. Fundación Universidad de América, 2018.

4. CONCLUSIONES

- Se implementó un fotorreactor a escala laboratorio monitoreado por Arduino de 456 mL y 5 cm de diámetro, siendo ésta la distancia ideal entre el sensor utilizado y el LED de chorro, en el cual fue posible obtener los datos transmitancia para posteriormente realizar una curva de calibración y obtener las concentraciones finales de AM en el sistema fotocatalítico, en donde U3 fue la que proporcionó el mayor porcentaje de remoción para la mayoría de las concentraciones.
- Al realizar la curva de calibración en el fotorreactor y obtener un r^2 de 0,9981, se observó que el fotorreactor podría ser una alternativa económica que puede disminuir el uso del espectrofotómetro en procesos de tratamiento de aguas, además que evita la toma constante de la muestra debido a que al calibrar el fotorreactor con agua destilada, se obtiene un valor de transmitancia para el blanco, lo cual permite reconocer cuando la muestra contaminada tiene una menor concentración del contaminante.
- El sistema de seguimiento por medio del software de Arduino permite la obtención de datos cada 1 milisegundo aproximadamente, facilitando la toma de datos para los tiempos determinados y así realizar las gráficas de remoción de cada disco con la mezcla fotocatalítica.
- La caracterización morfológica de las muestras se realizó mediante un microscopio óptico, donde se evidenció que hubo un buen mezclado de I y AC. Al realizar DRX, se evidenció que el AC, al ser amorfo, no permite que el rayo pase con igual intensidad a la mezcla I/AC y por ese motivo los picos de la mezcla eran menores a los picos obtenidos cuando se analizó la I sola.
- La relación entre las cantidades de I y AC es un factor importante que influye en el proceso de remoción de AM, debido a que una proporción baja de algún componente arroja porcentajes de remoción menores al 90%.
- El sistema de disposición removible de la mezcla en el fotorreactor se logró por medio del uso de o-rings y tela quirúrgica, creando discos, donde se favoreció el contacto entre la mezcla fotocatalítica y el contaminante permitiendo la remoción de este, como se observa en las gráficas y tablas de remoción de AM.
- La mezcla con la que se obtuvo el mejor porcentaje de remoción de AM fue la que contenía 50% I – 50% AC, ya que cuando se realizó la experimentación en el reactor de 25 mL, el mayor porcentaje de remoción fue 90,4% en U3 y en el reactor de 456 mL el mayor porcentaje de remoción fue de 94,8% en U1.

5. RECOMENDACIONES

- Los discos deben ser realizados en una tela preferiblemente delgada, la cual garantice el contacto entre la mezcla fotocatalítica y el colorante a remover, sin embargo, si se va a utilizar carbón activado y este será en polvo, se debe tener la precaución de que no existan derrames de este en el agua, ya que lo anterior modifica la medición del sensor.
- El burbujeo debe ser introducido por la cima del fotorreactor, esto con el fin de que no se modifique el valor de la señal de luz obtenida con el sensor.
- Se debe garantizar que el burbujeo mezcle la solución presente en el fotorreactor para no tener diferentes concentraciones a lo largo del tubo.
- Realizar la cinética de remoción del azul de metileno.
- Si se presentan variaciones grandes al momento de realizar la medición de la señal de la luz relacionadas con el sistema de burbujeo del fotorreactor, se recomienda utilizar una manguera transparente hasta que cree una especie de tubo Thiele en donde se podrá leer la señal de luz del LED de chorro directamente y así el burbujeo no altere la medición.
- Elaborar un diseño de experimentos y determinar cuáles son las variables de mayor importancia a tener en cuenta en los procesos de adsorción y degradación.

BIBLIOGRAFÍA

- ADA, Lady. Adafuit TSL 2591 High Dynamic Range Digital Light Sensor. [Consultado 14 de julio de 2018]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-tsl2591/overview>
- ADA, Lady. Pinouts. [Consultado el 07 de julio de 2018]. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-tsl2591/pinouts>
- ADAFRUIT. ARDUINO. [Consultado el 07 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>
- ALLABY, M. (2013). Dictionary Of Geology and Earth Sciences (4th ed.). Oxford University Press.
- APONTE, Andrés and BENAVIDES, Diana. Adecuación de un sistema sustentable de bajo costo para la purificación de agua lluvia con fotocátalisis solar. Fundación Universidad de América, 2017. p. 34.
- ARROYAVE, Joan A., et al. La Tartrazina, un colorante de la industria agroalimentaria, degradado mediante procesos de oxidación avanzada. En: REVISTA LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN. Vol. 5 No. 1, p. 22
- BAICUE, Juan. Degradación del azul de metileno y verde de malaquita por fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio dopado con nitrógeno (N-TiO₂) bajo luz visible. Universidad Tecnológica de Pereira. 2015
- BASILE, Angelo and DALENA, Francesco. Methanol - Science and Engineering - 16.6 Photoreactor. [Consultado el 26 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011G6LB2/methanol-science-engineering/photoreactor>
- BELTRAN, Tatiana and RIVERA, Cristian. Construcción de un reactor fotocatalítico monitoreado por LabVIEW para determinar el ciclo de vida de la ilmenita. Fundación Universidad de América, 2018. p. 59.
- CARBAJO OLLEROS, Jaime. Aplicación de la fotocátalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂. Madrid, España. Universidad Autónoma de Madrid, 2013. p. 30.
- CASADO et al. Design and validation of LED-based high intensity photocatalytic reactor for quantifying activity measurements. En: CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL. p. 1043-1055
- CASTAÑEDA JIMÉNEZ, Amparo Carolina. Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo. Proyecto de grado para optar al título Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Bogotá D.C. Escuela Colombiana e Ingeniería "Julio Garavito" 2014. p 14.

CHEN, Y. H. Synthesis, characterization and dye adsorption of ilmenite nanoparticles. En: JOURNAL OF NON-CRYSTALLINE SOLIDS. p. 136

Circuito.io. How to wire Adafruit TSL2591. [Consultado 13 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://www.circuito.io/app?components=512,11021,44359>

CLAVIJO, Julio. Sobre las reacciones de eliminación de compuestos contaminantes de aguas por fotocátalisis con TiO_2 /UV: caso azul de metileno. En: REVISTA DE ELEMENTOS. no. 3, p. 150-152

CLEVELAND, C., & MORRIS, C. Dictionary of Energy (Expanded Edition). [Consultado el 09 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDEEE0001/dictionary-energyexpanded/dictionary-energy-expanded>

DAINTITH, J., & MARTIN, E. Dictionary of Science . [Consultado el 09 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDSE00001/dictionary-science-6th/dictionary-science-6th>

DIAZ, David and PERDOMO, Karen. Evaluación de la actividad fotocatalítica del TiO_2 soportado en carbón activado para la degradación de azul de metileno. Fundación Universidad de América, 2018. p. 44.

DOMÈNECH, Xavier and JARDIM, Wilson F. y LITTER, Marta I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. 2001. 3-26 p.

FORERO, Jorge E.; ORTIZ, Olga p. and RIOS, Fabian. Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. En: CT&F CIENCIA, TECNOLOGÍA Y FUTURO. Vol. 3 No. 1, p. 99

GARCÉS GIRALDO, Luis F.; MEJÍA FRANCO, Edwin A.; SANTAMARÍA ARANGO, Jorge J. La fotocátalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación, 2009. 84 p.

GARCÍA-MUÑOZ, P. Ilmenite (FeTiO_3) as low cost for advanced oxidation processes. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING. .p. 542.

GÓMEZ, I., & ARROLLO, X. [Consultado el 30 de octubre de 2018]. Difracción de rayos X. Obtenido de Universidad Complutense Madrid: <https://www.ucm.es/tecnicasgeologicas/difraccion-de-rayos-x-drx>

GOU, H.; XHANG, G.; HU, X.; CHOU, K. Kinetic study on carbothermic reduction of ilmenite with activated carbon. 2012. p. 1856-1851.

GUARÍN LLANES, Carolay Y.; MERA BENAVIDES, Adriana C. Fotocatálisis heterogénea con TiO_2 para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del

indicador verde de bromocresol. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 2011. p 81.

HASSAN,M.; ZHAO,Y. and XIE,B. Employing TiO₂ photocatalysis to deal with landfill leachate: Current status and development. En: CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL.

HERRMANN, J.M. Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocátalisis heterogénea. En: Solar Safe Water. p 154.

HERNÁNDEZ, Alma. Degradación del azul de metileno y 4-Clorofenol por fotocátalisis con luz ultravioleta, utilizando TiO₂ como catalizador. Instituto Tecnológico de Toluca. 2010

HOW TO CONNECT ARDUINO UNO TO LUX SENSOR. [Consultado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.circuito.io/app?components=512,11021,44359>

IANNICELLI-ZUBIANI, Elena M.; GALLO STAMPINO, Paola and CRISTIANI, Cinzia. Enhanced lanthanum adsorption by amine modified activated carbon. En: CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL.p. 399.

INAGAKI, Michio KANG, Feiyu TOYODA, Masahiro and KONNO, Hidetaka. (2014). Advanced Materials Science and Engineering of Carbon - 13. Carbon Materials in Photocatalysis. pp. 289,290. [Consultado el 10 de diciembre de 2018] Elsevier. Obtenido de: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U72381/advanced-materials-science/carbon-materials-in-photocatalysis>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486- 6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. 153 p. ISBN 978-958-8585-67-3.

LEE, R.; JUAN, J.; LAI, C.; LEE, K. Ilmenite: Properties and photodegradation kinetic on Reactive Black 5 dye. En: Chinese Chemical Letters. 2017.

MAHMOODI, M.; JAMES, L. A. and JOHANSEN, T. Automated advanced image processing for micromodel flow experiments; an application using LabVIEW. En: JOURNAL OF PETROLEUM SCIENCE AND ENGINEERING. p. 55.

MARTINEZ, Alicia. Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano. . Universidad San Jorge, 2012. p. 4.

MEHDILO, A.; IRANNAJAD, M. and REZEI, B. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effects on physical and surface properties. En: MINERALS ENGINEERING. p. 76.

MURILLO, Herman. Obtención de un compuesto de dióxido de titanio y carbón activado aplicado a la oxidación fotocatalítica del ión cianuro. Escuela Politécnica Nacional, 2015. p. 9.

NATIONAL INSTRUMENTS. User Guide myDAQ. [Consultado el 28 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373060g.pdf>

ORTIZ, Diógenes. Ilmenita. [Citado el 09 septiembre de 2018]. Disponible en: <http://distribuidoresdeilmenita.com/>

PALLARÉS, Javier; GONZÁLEZ-CENCERRADO, Ana and ARAUZO, Inmaculada. Production of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. En: BIOMASS AND BIOENERGY. p. 64

PARRA, E. Iluminación: Lux, Lumen y Candela. [Consultado el 11 de diciembre de 2018]. Disponible en: <https://bricos.com/2013/07/iluminacion-lux-lumen-y-candela/>

R. , A., T., K. C., P., N. P., J., H. S., A., D. S., J., L. V. Oxford Dictionary of Biochemistry and Molecular Biology [Consultado el 09 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpODMBE01/oxford-dictionarybiochemistry/oxford-dictionary-biochemistry>

ROSAS, Jose. Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes. Universidad Autónoma de Nuevo Leon, 2012b. p. 4.

TAOS. TSL 2560, TSL 2561. [Consultado el 15 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>

SCHASCHKE, C. Dictionary of Chemical Engineering. [Consultado el 09 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDCE00021/dictionary-chemicalengineering/dictionary-chemical-engineering>

SIGMA ELECTRONICA. Arduino Uno R3. [Consultado el 4 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.sigmaelectronica.net/producto/a000066/>

UNAM. Fundamentos de Espectrofotometría. [Consultado el 27 de octubre de 2018]. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/PRACTICA6ESPECTROFOTOMETRIA_21576.pdf

UNIVERSIDAD DE ALICANTE. Sistema de adquisición y procesamiento de datos. [Consultado el 31 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19119/1/Sistemas%20de%20adquisici%C3%B3n%20y%20Procesamiento%20de%20datos.pdf>

VALÈNCIA,U. P. Microscopía electrónica de barrido. [Consultado el 09 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.upv.es/entidades/SME/info/753120normalc.html>

VAN DOORSLAER, Xander; DEWULF, Jo; DE MAERSCHALK, Jorik; VAN LANGENHOVE, Herman; DEMEESTERE, Kristof. Heterogeneous photocatalysis of moxifloxacin in hospital effluent: Effect of selected matrix constituents. En: Chemical Engineering Journal. 2015. p 9-16.

WU, C., & CHANG, C. (2006). Decolorization of Reactive Red 2 by Advanced Oxidation Processes: Comparative Studies of Homogeneous and Heterogeneous systems. Journal of Hazardous Materials, 2-3.

YAMAGUCHI, D.; TANG, L.; CHIANG, K. Pre-oxidation of natural ilmenite for use as an oxygen carrier in the cyclic methane-steam redox process for hydrogen production. En: Chemical Engineering Journal. 2017

YUBAL. ¿Qué es Arduino, cómo funciona?. [Consultado el 07 de 2018]. Disponible en: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>

ANEXOS

ANEXO A. CERTIFICADO DE ORIGEN ILMENITA

Bogotá DC., Septiembre de 2018

Por medio del presente documento certifico que el material “Arena de ilmenita (TiO₂) proviene del municipio de Barbacoas, Departamento de Nariño, extraída de minas de aluvión de este municipio, circundantes a los ríos Telembi y Telpi y que contiene un 47% aproximado de FeO y un 53% de TiO₂.

Usos recomendados:

Materia prima para la producción de pigmentos de dióxido de titanio.

Materia prima para la fabricación del rutilo sintético.

Se emplea también como fundente de soldadura, en siderurgia con hornos BOF, y para lodos de perforación.

Purificación de agua potable

No se identifica ningún peligro de acuerdo a la clasificación de Worksafe1 Australia

PELIGROS:

Clase y Riesgo Secundario: Ninguna
mención Código Hazchem: Ninguna
mención

Listado de sustancias tóxicas: Ninguna mención

POSIBLES EFECTOS SOBRE LA SALUD

INGESTIÓN: Sin toxicidad. No se conoce ningún riesgo derivado de la ingestión fortuita de pequeñas cantidades, como pudiera ocurrir durante las tareas normales de manipulación. Sin embargo, debido a la agresividad de este

material, su ingestión en cantidades más grandes podría ocasionar irritación al sistema digestivo.

OJOS: Los sólidos y polvos podrán causar irritación moderada debido a su asperidad.

PIEL: Riesgo bajo

INHALACIÓN: Si bien se suele considerar como polvo ambiental inerte, su inhalación en concentraciones altas podrá provocar irritación. Se han de emplear controles contra el polvo en todas aquellas situaciones en que la manipulación o procesamiento del material pudieran crear cantidades apreciables de polvo.

INFORMACIÓN ECOLÓGICA

La posibilidad de que este material ocasione daños medioambientales es escasa; no se disuelve en el agua y es poco probable que contamine el medio hidráulico y las cadenas alimenticias.

Atentamente,



DIOGENES MATIAS ORTIZ CORTES

Manager

Tel. (051) - 2563808

Cel. (057) -3209140485

Web: www.mineralescolombianos.com Bogotá-Colombia

ANEXO B.

HOJA DE SEGURIDAD CARBÓN ACTIVADO CLARIMEX



CARBÓN ACTIVADO CLARIMEX CAGR 8 X 30

El Carbón Activado CLARIMEX CAGR es un producto de alta calidad, de origen mineral, fabricado a partir de lignita y lavado con ácido. Diseñado para cubrir las necesidades de operación en columnas de adsorción y susceptible de ser reactivado térmicamente.

Este producto por su alta eficiencia es ideal para aplicaciones de decoloración en fase líquida, también adsorbe eficientemente pesticidas y herbicidas, así como otros químicos tóxicos y precursores de trihalometanos, lo que lo hace un carbón ideal para tratamiento de agua.

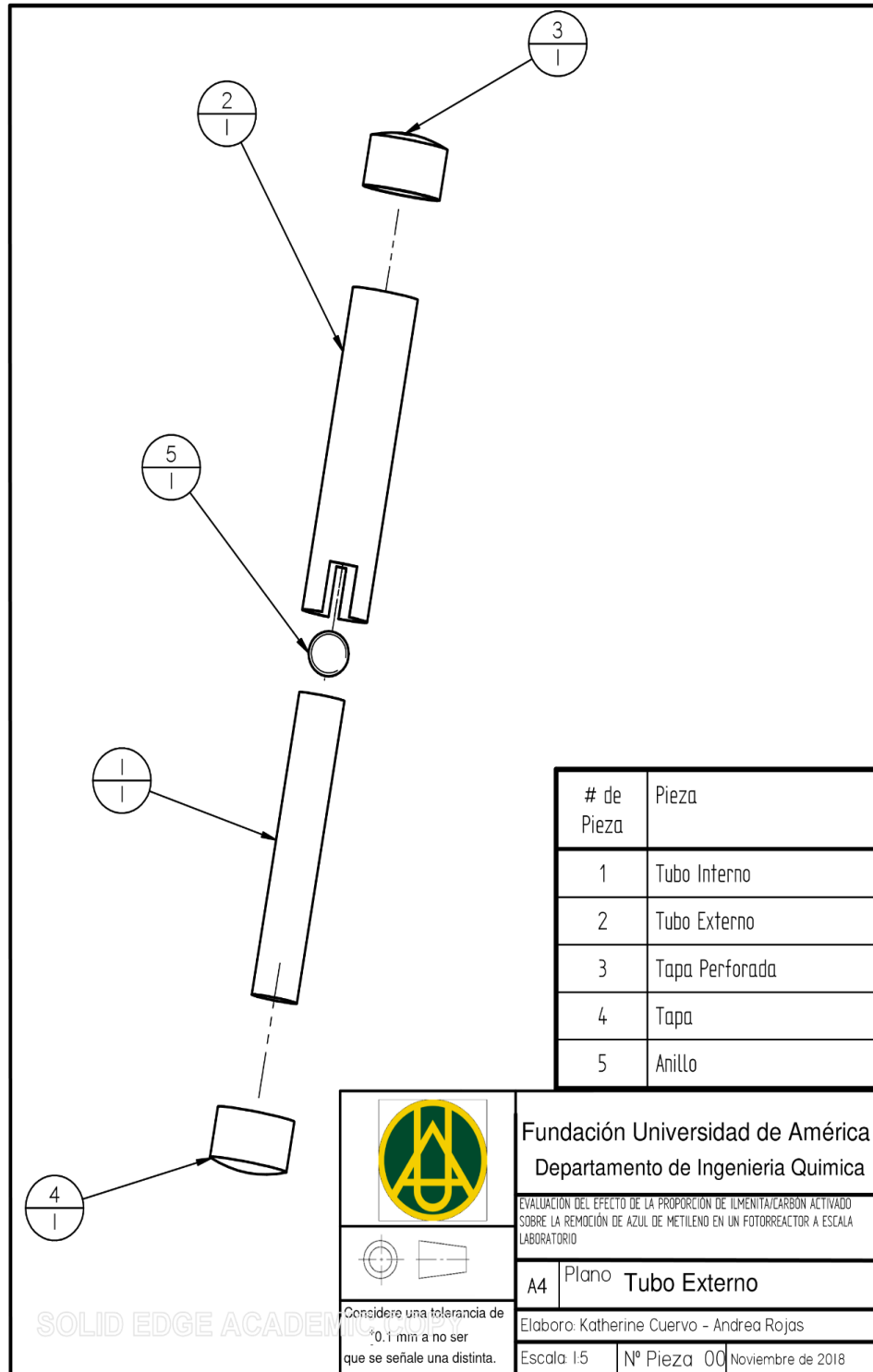
El carbón CLARIMEX CAGR es ampliamente usado en la industria embotelladora debido a su alta eficiencia de decoloración. El carbón CLARIMEX CAGR cumple con los estándares de la AWWA B604.

	ESPECIFICACIONES	PROPIEDADES TÍPICAS
Humedad al empaque, %	0 máx	4
pH	4.0 – 7.0	5.0 – 6.0
Actividad relativa de melazas, %	98 mín	102
Número de Iodo, (mg I ₂ / g)	600 mín	660
Densidad Aparente, g / cc		0.38
Valor de Tanninos (p.p.m)		220
Número de Melazas		425
Polvo %		0.30 max
Área superficial (Método N2 BET m ² / g)		600
Dámetro promedio de poro, Å		56
Volumen de poro, ml / g		0.93
Número de abrasión (NBS)		80
Densidad Lavado y Drenado gr/cc		0.36
Tamaño promedio de Partícula mm		1.3
GRANULOMETRIAS DISPONIBLES:		
8X30 + M 8	5 % máx.	2 %
- M 30	5 % máx.	2 %

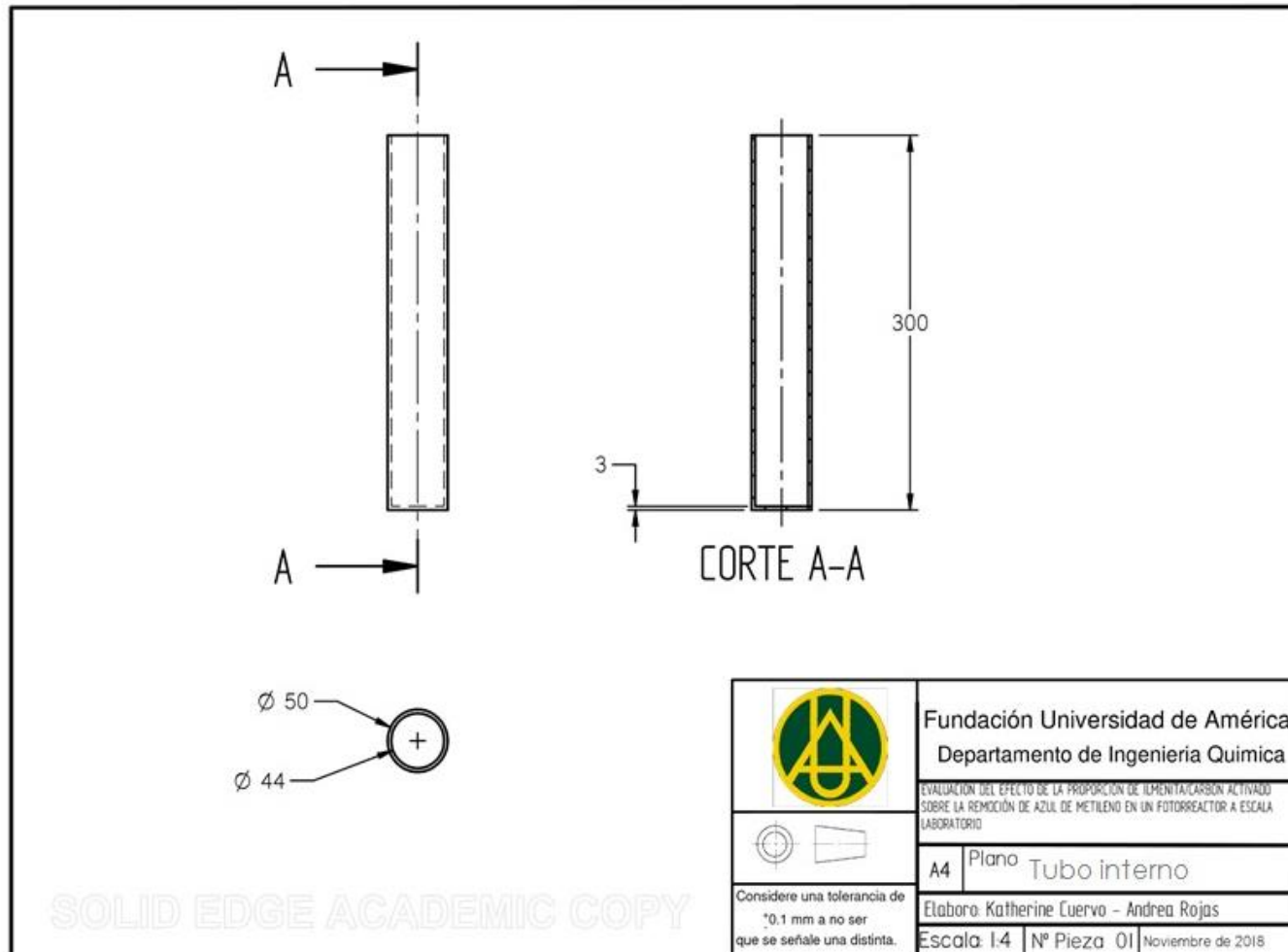
EPT-CAGR
07-03 R00

ANEXO C.

PLANO TUBO EXTERNO EXPLOSIONADO DEL FOTORREACTOR

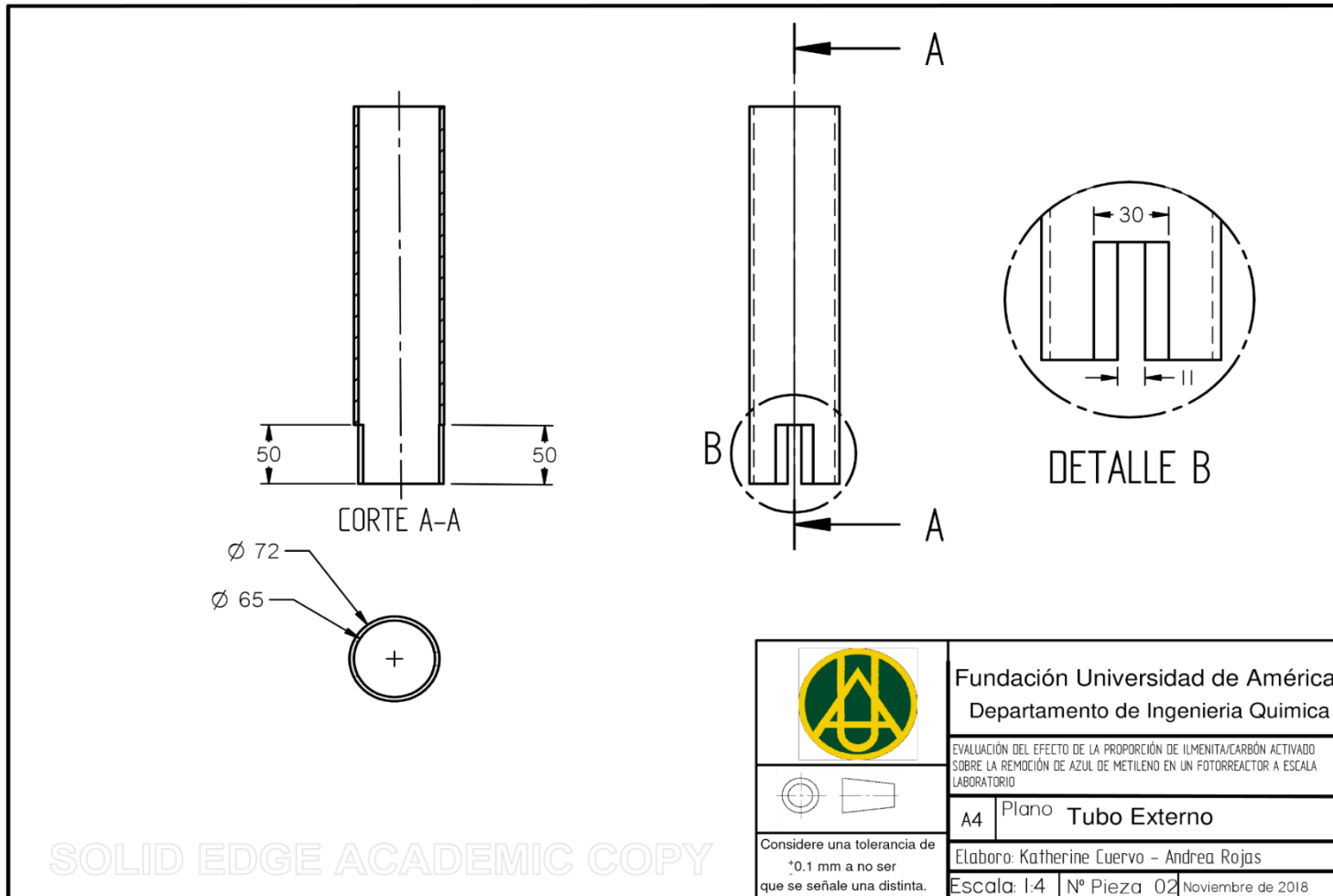


ANEXO D.
ESTRUCTURA INTERNA DEL FOTORREACTOR



ANEXO E.

TUBO EXTERNO DEL FOTORREACTOR

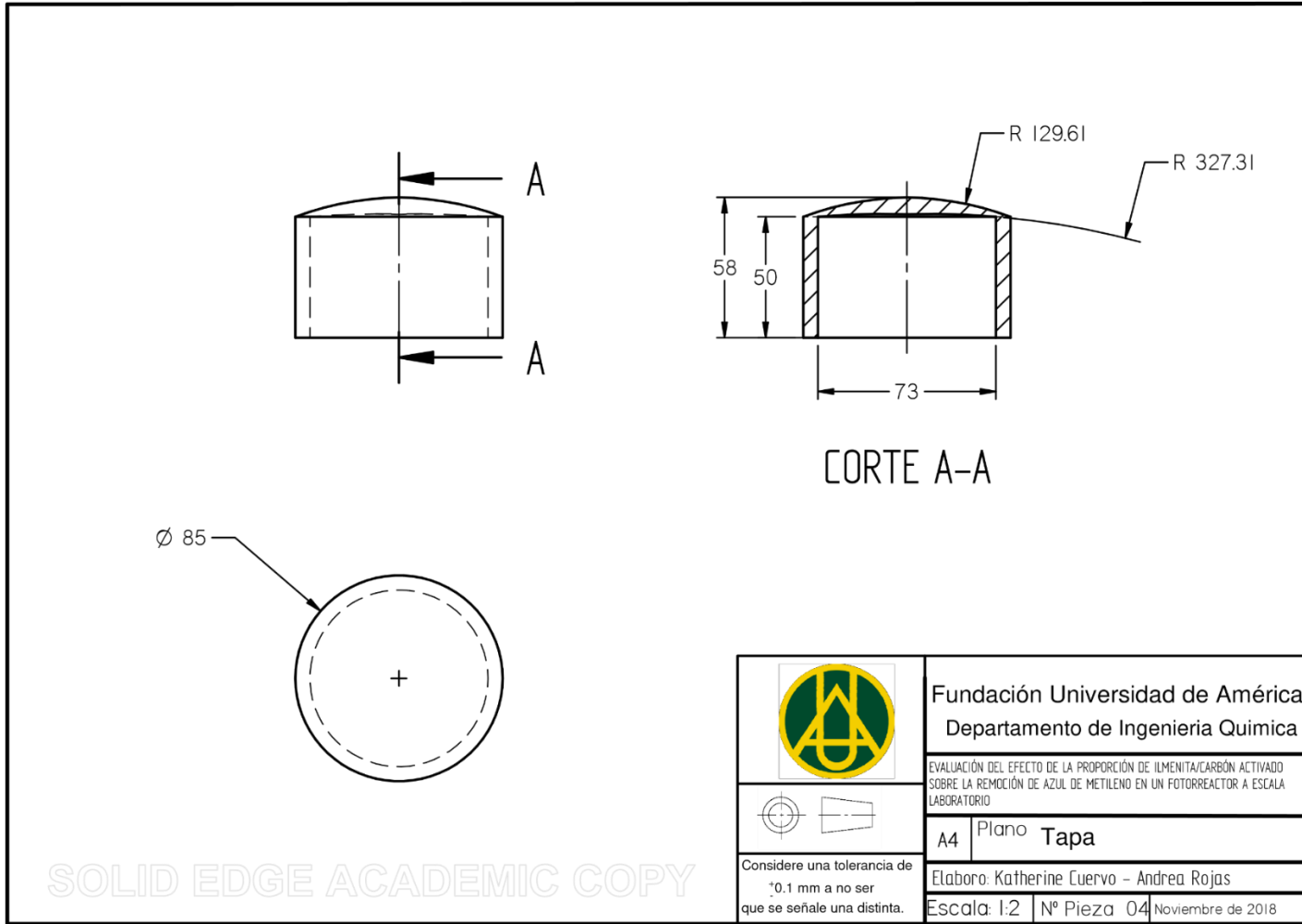


	Fundación Universidad de América	
	Departamento de Ingeniería Química	
	EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PROPORCIÓN DE ILUMENITA/CARBÓN ACTIVADO SOBRE LA REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO EN UN FOTORREACTOR A ESCALA LABORATORIO	
	A4	Plano Tubo Externo
Elabora: Katherine Cuervo - Andrea Rojas		
Escala: 1:4 N° Pieza 02 Noviembre de 2018		

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Considere una tolerancia de ± 0.1 mm a no ser que se señale una distinta.

**ANEXO F.
TAPA DEL FOTORREACTOR**



	Fundación Universidad de América Departamento de Ingeniería Química
	EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA PROPORCIÓN DE ILMENITA/CARBÓN ACTIVADO SOBRE LA REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO EN UN FOTORREACTOR A ESCALA LABORATORIO
Considere una tolerancia de ±0.1 mm a no ser que se señale una distinta.	A4 Plano Tapa
Elabora: Katherine Cuervo - Andrea Rojas	
Escala: 1:2 N° Pieza 04 Noviembre de 2018	

ANEXO G.

TAPA PERFORADA DEL FOTORREACTOR

