

EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE FIJACIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO
MODIFICADO CON ÓXIDO DE COBRE (TiO_2/CuO) SOBRE PET PARA LA
REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO

ELIANA ESTEFANY QUEVEDO RAMIREZ

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

EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE FIJACIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO
MODIFICADO CON ÓXIDO DE COBRE (TiO_2/CuO) SOBRE PET PARA LA
REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO

ELIANA ESTEFANY QUEVEDO RAMIREZ

Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Dr. Sc. Cesar Augusto Quiñones Segura
Doctor en ciencias

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

NOTA DE ACEPTACIÓN

Dra. Adriana Páez Morales

Ing. Orlando Castiblanco Urrego

Bogotá, D. C., Septiembre 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente institucional y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrector Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano General de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director de investigaciones

Manuel Cancelado Jiménez

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

A Dios por bendecirme y guiarme en el camino de la vida y por permitirme este logro, a mis padres Wilson Quevedo Delgado y Beatriz Mile Ramirez Cuellar por brindarme su apoyo incondicional en las decisiones que tomo, por su ayuda, sus consejos, sus regaños, y todo lo que hacen para que cada día sea una mejor persona, gracias a ellos he logrado cada meta que me propongo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por permanecer a lo lado en cada decisión, por su apoyo en este proyecto y en su realización.

Al Dr. Sc. Cesar Augusto Quiñones Segura por permitirme pertenecer al grupo de investigación de Materiales Fotoactivos y por ayudarme en el proceso de aprendizaje durante el trabajo de grado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA	17
1.1 DIÓXIDO DE TITANIO (TiO ₂)	18
1.2 ÓXIDO DE COBRE	19
1.3 POLIETILENO TEREFALATO	19
1.3.1 Propiedades y características	21
1.3.2 Resistencia química del PET	21
1.3.3 Métodos de fijación en PET	21
1.3.3.1 Ataque con agentes ácidos al PET	21
1.3.3.2 Agente ligante	22
1.3.3.3 Magnetron sputtering	22
1.3.3.4 Método Sol gel	22
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
2.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE FIJACIÓN DE TiO ₂ /CuO EN PET	24
2.2 PRE-TRATAMIENTO DEL POLÍMERO	26
2.3 INMOVILIZACIÓN DEL SEMICONDUCTOR EN PET	26
2.3.1 Pre-Experimentación	26
2.3.2 Experimentación	27
2.3.2.1 Materiales empleados para la elaboración de la mezcla	27
2.3.2.2 Selección de dióxido de titanio	27
2.3.2.3 Tratamiento térmico TiO ₂	28
2.3.2.4 Selección de solventes	29
2.3.2.5 Suspensión	30
2.3.2.6 Protocolo de fijación de TiO ₂	30
2.3.2.7 Mezcla TiO ₂ /CuO	30
2.3.2.8 Prueba de resistencia	30
2.4 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS PELÍCULAS REALIZADAS	31
2.4.1 Curva de calibración para el azul de metileno a 665 nm.	31
2.4.2 Fuente de luz	31
2.4.3 Reactor	31
2.4.4 Fuente de agitación	32
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
3.1 ELECCIÓN de DIÓXIDO de Titanio	33
3.1.1 Determinación de Dióxido de Titanio a utilizar	33

3.1.2	Tratamiento térmico	34
3.2	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y ESTRUCTURAL	36
3.2.1	Caracterización estructural por difracción de rayos X (DRX)	36
3.2.2	Caracterización morfológica con un microscopio electrónico de barrido (SEM)	37
3.3	CURVAS DE DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO	38
3.3.1	Curvas de degradación de azul de metileno con TiO ₂ inmovilizado en láminas de PET	38
3.3.2	Curvas de degradación de azul de metileno con TiO ₂ /CuO inmovilizado en láminas de PET	39
4.	CONCLUSIONES	43
5.	RECOMENDACIONES	44
	BIBLIOGRAFÍA	45
	ANEXOS	50

LISTAS DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Métodos para soportar TiO ₂ sobre Polietileno Tereftalato	24
Tabla 2. Tabla de decisión de proceso	25
Tabla 3. Datos encontrados para experimentación	26
Tabla 4. Parámetros de solubilidad de los compuestos involucrados inicialmente	29
Tabla 5. Parámetros de solubilidad y temperatura de ebullición de solventes propuestos	29
Tabla 6. Porcentaje de degradación con tiempo constante	35
Tabla 7. Porcentaje de degradación con temperatura constante	36
Tabla 8. Porcentaje de degradación de azul de metileno a diferentes concentraciones de precursor en luz visible	40
Tabla 9. Porcentaje de degradación de azul de metileno a diferentes concentraciones de precursor en luz ultravioleta	41
Tabla 10. Comparación de porcentaje de degradación luz visible Vs luz ultravioleta luego de modificación	42

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Modelo de un fotocatalizador semiconductor de TiO_2	18
Figura 2. Estructura de poli(etilentereftalato)	20
Figura 3. Estructura amorfa y semicristalina de PET	20
Figura 4. Esquema del montaje de degradación	32
Figura 5. Remoción azul de metileno	33

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. Curva de calibración de azul de metileno a 665 nm	31
Grafica 2. Remoción de azul de metileno con diferentes TiO_2	34
Grafica 3. Remoción de azul de metileno a diferentes temperaturas y tiempo constante	35
Grafica 4. Remoción de azul de metileno a diferente tiempo y temperatura constante	36
Grafica 5. Análisis DRX de película de TiO_2/CuO sobre PET	37
Grafica 6. Caracterización SEM de película de TiO_2/CuO sobre PET	38
Grafica 7. Dióxido de titanio a temperatura y tiempo de calcinación definido	39
Grafica 8. Remoción de azul de metileno a diferentes concentraciones de precursor en luz visible	40
Grafica 9. Remoción de azul de metileno a diferentes concentraciones de precursor en luz ultravioleta	41

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Ficha técnica de DIÓXIDO DE TITANIO HOMBITAN AFDC	51
Anexo B. Protocolo de lavado para laminas PET	52
Anexo C. Diagramas para fijación de TiO ₂ en láminas PET	53
Anexo D. Diagrama de flujo para deposición de la modificación	54
Anexo E. Tratamiento térmico del dióxido de titanio	55
Anexo F. Ecuaciones de degradación	56

GLOSARIO

BAND GAP: banda ubicada entre la banda de valencia y la de conducción, el Band Gap indica la energía mínima que necesita un electrón para pasar de una banda a la otra en un semiconductor

FOTOCATÁLISIS: la fotocatalisis heterogénea es uno de los procesos avanzados de oxidación que se basa en la absorción directa o indirecta de luz (visible o UV) por un sólido. En la región de interfase entre sólido excitado y la solución tienen lugar las reacciones, sin que el catalizador sufra cambios químicos.

LUZ VISIBLE: es una región del espectro electromagnético cuyas ondas tienen una longitud que va desde los 780 nm (luz roja) a unos 380 nm (luz violeta). Esta región del espectro es la luz que percibe el ojo humano.¹

SEMICONDUCTOR: es un material semiconductor tiene un valor de conductividad eléctrica cae entre la de un conductor, tal como cobre, y un aislante, como el vidrio. La comprensión moderna de las propiedades de un semiconductor se basa en la física cuántica para explicar el movimiento de los electrones y los agujeros en una red cristalina.²

¹ FLORES, Elena; PAREDES, Carmen Roque and LUNA, Rómulo Ochoa. Química del color. En: REVISTA DE QUÍMICA. vol. 9, no. 2, p. 99-109

² Diana Carolina Barrera Toca y Cristian Andrés Monroy Leyton. Evaluación Del Método De Fijación De TiO₂ Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de América, 2015. P.16

RESUMEN

En este trabajo de investigación se realizó la evaluación del método de fijación de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre TiO_2/CuO en láminas de poli(etileno tereftalato) (PET); este proceso se llevó a cabo por el método de agente ligante, método que fue seleccionado a partir de referencias bibliográficas sobre temas relacionados; se realizó una variación de temperatura y tiempo de calcinación para la activación del dióxido de titanio.

La modificación de la lamina de PET o poli(etileno tereftalato) con dióxido de titanio se realizó mediante el método de Dip coating, diferentes concentraciones de Sulfato de cobre como precursor y calcinación a 100°C , una vez obtenidas las películas modificadas se logró obtener la comparación de la actividad fotocatalítica de las películas modificadas y sin modificar, obteniendo resultados de 17,69% y 9,91% respectivamente en radiación de luz visible, con la película modificada con 0,06M.

La caracterización morfológica y estructural de las películas con la mezcla depositada se realizó por microscopia electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD) respectivamente, en donde se evidencia la presencia de TiO_2 , de CuO y las respectivas aglomeraciones entre dichos compuestos sobre el poli(etileno tereftalato).

Palabras clave: PET, dióxido de titanio, óxido de cobre, azul de metileno.

INTRODUCCIÓN

El proceso de fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio es un proceso que actualmente se ha venido desarrollando en el mundo gracias a su amplia aplicación; cuando se busca que el dióxido de titanio tenga una mejora se busca realizarle una modificación y la modificado con oxido de cobre ya ha sido punto de investigación por el grupo de investigación de Materiales Fotoactivos, a que a pesar de que el dióxido de titanio tiene una actividad fotocatalítica de hasta el 99% esta debe realizarse en un espectro de luz ultravioleta y la necesidad de realizar fotocatalisis en luz visible nos lleva a realizar modificaciones para que el dióxido de titanio trabaje en luz visible y con ello tenga mayor aplicación a nivel industrial.

Por otro lado, la deposición de la modificación en un soporte radica en los altos costos de la recuperación del fotocatalizador. Por lo general el dióxido de titanio con o sin modificación, en este caso modificado con oxido de cobre (TiO_2/CuO), es soportado sobre placas de vidrio y/o aluminio ya que estas permiten inmovilizar el fotocatalizador en forma de película delgada, sin embargo, estos soportes tienen problemas de fragilidad y costo respectivamente; por esta razón es necesario buscar un material que tenga un menor costo y mayor resistencia a la fragilidad.

Este proyecto tiene como propuesta implementar el PET un termoplástico que es altamente utilizado en industria por sus propiedades de gran resistencia mecánica y química, facilidad de producción, resistencia al desgaste, amortiguación, entre otros. Propiedades que le permite ser una excelente alternativa de soporte para el dióxido de titanio modificado con oxido de cobre (TiO_2/CuO), además de ayudar con el impacto ambiental que generan los residuos de plásticos en el planeta.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el método de fijación de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre (TiO_2/CuO) sobre PET para la remoción de azul de metileno.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar el método adecuado para la fijación de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre (TiO_2/CuO) sobre PET.
- Depositar dióxido de titanio modificado con óxido de cobre (TiO_2/CuO) sobre PET.
- Caracterizar morfológica y estructuralmente la película de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre (TiO_2/CuO) sobre PET.
- Evaluar la remoción fotocatalítica de azul de metileno con películas de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre (TiO_2/CuO) soportadas en PET.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

La fotocatalisis heterogénea pertenece al grupo de las denominadas Tecnologías de oxidación avanzadas de oxidación (TAOs) de radicales oxidantes^{3 4}; la cual puede realizarse en diferentes medios: fase gaseosa, fase líquida orgánicas puras o disoluciones acuosas; no es selectiva y se basa en la generación de radicales hidroxilo por medio de reacciones de óxido-reducción que suceden en la superficie de un fotocatalizador, el campo electrónico en la superficie del semiconductor y las bandas se forman y se curvan desde el interior del semiconductor hasta la superficie⁵, debido a la acción de la luz UV o luz visible y la presencia de un agente oxidante como lo es el oxígeno presente en el aire o el peróxido de hidrogeno. En la región interfacial, entre el sólido excitado y la solución, tienen lugar las reacciones de destrucción de los contaminantes, sin que el fotocatalizador sufra cambios químicos, el fotocatalizador que se utilice puede estar en forma de suspensión para aumentar el área de acción o inmovilizado sobre algún soporte para evitar una posterior etapa de separación y adicionalmente para permitir su reutilización⁶.

El concepto de fotocatalisis mediante el uso de semiconductores como el TiO_2 se basa en la capacidad de absorber la luz, lo que resulta en una mayor reactividad con el agua y sus solutos; el semiconductor puede ser excitado de dos formas:

- Por excitación directa es decir este es quien absorbe los fotones usados en el proceso.
- Por excitación inicial de moléculas adsorbidas en la superficie del catalizador, las que a su vez son capaces de inyectar cargas (electrones) en el semiconductor⁷

En la Figura 1 se muestra un modelo simple de semiconductores basados en TiO_2 , que muestra la ionización inducida por la luz sobre la banda prohibida.⁸

³ GUARIN LLANES, Carolay Yaneth y MERA BENAVIDES, Adriana Consuelo. Fotocatalisis heterogénea con TiO_2 para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol. En: Revista De Ingenierías: Universidad De Medellín. vol. 10, no. 19, p. 79-88

⁴ GÁLVEZ, Julián Blanco, et al. Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: estado del arte. En: CYTED. ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES POR FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.

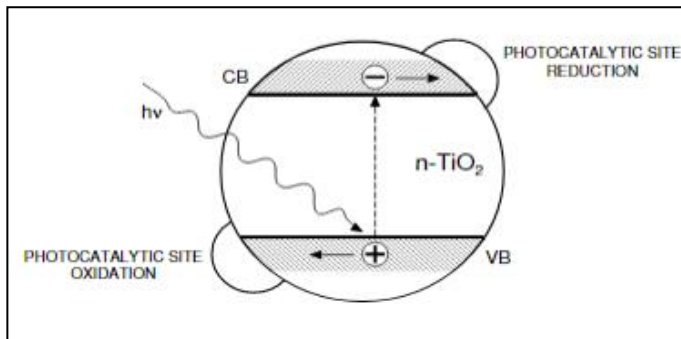
⁵ Luis Fernando Garcés Giraldo; Edwin Alejandro Mejía Franco y Jorge Julián Santamaría Arango. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: Revista Lasallista De Investigación. vol. 1, no. 1,

⁶ MALATO, S., et al. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. 2009.1-59

⁷ Diana Carolina Barrera Toca y Cristian Andres Monroy Leyton. Evaluación Del Método De Fijación De TiO_2 Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de America, 2015. P. 20

⁸ NOWOTNY, Janusz and NOWOTNY, Maria K. Solid State Chemistry and Photocatalysis of Titanium Dioxide: Special Topic Volume with Invited Peer Reviewed Papers Only. Stafa-Zuerich: Trans Tech Publications, 2010. P. 77

Figura 1. Modelo de un fotocatalizador semiconductor de TiO_2



Fuente: NOWOTNY, Janusz and NOWOTNY, Maria K. Solid State Chemistry and Photocatalysis of Titanium Dioxide: Special Topic Volume with Invited Peer Reviewed Papers Only. Stafa-Zuerich: Trans Tech Publications, 2010 p. 77. Disponible en web: <http://ezproxy.uws.edu.au/login?url=http://site.ebrary.com/lib/sydney/reader.action?docID=10828940>

La carga espacial, que se forma en la interfaz TiO_2 /agua, y los campos eléctricos relacionados, conducen a la separación de electrones y agujeros de electrones que se transfieren a sitios catódicos y anódicos, respectivamente. Esto, en consecuencia, da como resultado un aumento de la reactividad de estos sitios.⁹

1.1 DIÓXIDO DE TITANIO (TiO_2)

El dióxido de titanio es un material compuesto de titanio y oxígeno TiO_2 es clasificado como un material semiconductor.¹⁰ Posee color blanco característico, es utilizado en fotocatalisis, "pinturas, revestimientos, adhesivos, papel, plásticos, caucho, tintas de impresión, telas, tejidos recubiertos, así como cerámicas, revestimientos de suelos, materiales para techos, cosméticos, dentífricos, jabones, agentes para el tratamiento de agua, productos farmacéuticos, colorantes alimentarios, productos para el automóvil, protectores solares"¹¹. El dióxido de titanio consta de tres estructuras cristalinas Rutilo, Anatasa y Brookita. El Rutilo se encuentra en forma octaédrica mientras que Anatasa y Brookita en octaedros distorsionados, gracias a dicha diferencia el Rutilo es de 2 kcal a 3 kcal más estable

⁹ Ibid. p.77

¹⁰ QUIROZ GAITÁN, Heiddy Paola. Preparación y estudio de las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas de nanotubos de TiO_2 para su aplicación en sensores ópticos. 2014. P. 8.

¹¹ [Anónimo]Usos del dióxido de titanio | Información sobre la seguridad química. [Consultado el Apr 5,2018]. Disponible en: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/dioxido-de-titanio/>

que anatasa haciendo más estable el TiO_2 .¹² El TiO_2 es un material de gran disponibilidad en la naturaleza, alta estabilidad térmica y posee bajo costo.¹³ Sin embargo, el rendimiento de los fotocatalizadores de óxido implica las reacciones tanto en sitios activos anódicos como catódicos. El rendimiento estable requiere que la transferencia de carga en ambos lados sea idéntica. Por lo tanto, la maximización del rendimiento para los semiconductores de tipo n, como el TiO_2 , requiere que el rendimiento en los sitios catódicos se mejore.¹⁴

1.2 ÓXIDO DE COBRE

El óxido cúprico u óxido de cobre (II) es un compuesto abundante en la naturaleza como uno de los componentes de minerales como tenorita y paramelaconita. Es comúnmente utilizado en la industria para gran variedad de cosas como pigmentos para cristales, esmaltes de porcelana y gemas artificiales, también como agente desulfurante para gases de petróleo, en electrodos galvánicos y como catalizador de oxidación, esto gracias a que es un agente oxidante/reductor ampliamente utilizado con una banda prohibida estrecha, de 1,2 eV. También es un regulador del proceso en la reacción química. Además de esto posee propiedades fungicidas y microbicidas razones por la cual también encuentra uso como insecticida y fumigante, para eliminar en forma segura materiales peligrosos tales como cianuro, hidrocarburos, hidrocarburos halogenados y dioxinas, a través de oxidación^{15,16}

1.3 POLIETILENO TEREFALATO

El Polietileno Tereftalato (PET) es un polímero termoplástico perteneciente a la familia del poliéster aromático proveniente del petróleo, su monómero es un homopolímero de condensación compuesto de dimetil tereftalato (DMT) y etilenglicol (EG), generando su estructura repetitiva¹⁷

¹² QUIROZ GAITÁN, Heiddy Paola. Preparación Y Estudio De Las Propiedades Estructurales, Ópticas Y Morfológicas De Nanotubos De TiO_2 Para Su Aplicación En Sensores Ópticos. 2014. P. 8

¹³ BARRERA Diana Carolina y MONROY Cristian Andres. Evaluación Del Método De Fijación De TiO_2 Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Trabajo de grado. Bogotá. D.C. Fundación Universidad de America, 2015.

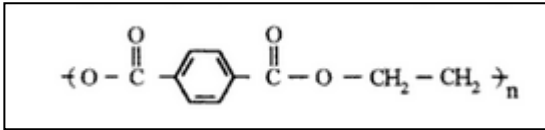
¹⁴ NOWOTNY, Janusz and NOWOTNY, Maria K. Solid State Chemistry and Photocatalysis of Titanium Dioxide: Special Topic Volume with Invited Peer Reviewed Papers Only. Stafa-Zuerich: Trans Tech Publications, 2010 P. 77.

¹⁵ DIAZ, Rafael. Óxido Cúprico. [Consultado el Ago. 2, 2018]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/oxido-cuprico/>

¹⁶ Oxido de cobre (II). [Consultado el Ago. 1, 2018]. Disponible en: [https://www.ecured.cu/%C3%93xido_de_Cobre_\(II\)](https://www.ecured.cu/%C3%93xido_de_Cobre_(II))

¹⁷ FAKIROV, Stoyko. Polyethylene Terephthalate. En: OLABISI, Olagoke. Handbook of Thermoplastics. 1 ed. Marcel dekker inc, ISBN 0-8247-9797-3. 1997. p. 449-462

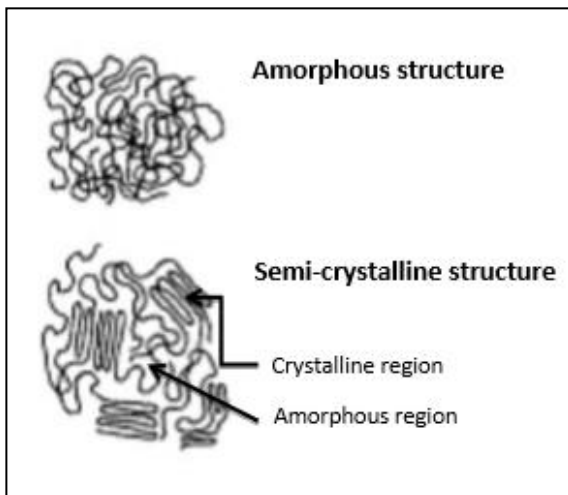
Figura 2. Estructura de poli(etilentereftalato)



Fuente: FAKIROV, Stoyko. Polyethylene Terephthalate. Handbook of Thermoplastics.1 ed. Marcel dekker inc, 1997. p. 450. Disponible en web: <https://www.worldcat.org/title/handbook-of-thermoplastics/oclc/36241597/viewport>

La estructura cristalina del polietileno tereftalato PET puede ser semicristalina o amorfa; de su estructura depende también la densidad, se conoce que en el PET amorfo la densidad varía entre 1,328 g/cm³ y 1,341 g/cm³ este valor de densidad depende del contenido de etilenglicol en su estructura el cual oscila entre 1,83 y 14,90% en moles.¹⁸

Figura 3. Estructura amorfa y semicristalina de PET



Fuente: SALMINEN Ponto. Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in the Production of Bottle Trays. Arcada University of Applied Sciences, 2013. p. 16. Disponible en web: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/57923/Salminen_Pontus.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Por consiguiente, algunas de las propiedades cambian dependiendo de la estructura cristalina, cuando es amorfo el polímero tiene amplia gama de ablandamiento, por lo general es transparente y de baja contracción, posee baja resistencia química, y resistencia al desgaste; Cuando es semi-cristalino, por lo

¹⁸ Diana Carolina Barrera Toca y Cristian Andres Monroy Leyton. Evaluación Del Método De Fijación De TiO₂ Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de America, 2015. P. 24

general es opaco de alta contracción, con alta resistencia química y resistencia al desgaste.¹⁹²⁰

1.3.1 Propiedades y características²¹

- Cristalinidad y transparencia, admite cargas de colorantes
- Alta resistencia al desgaste
- Buena barrera a CO₂, aceptable barrera contra la humedad.
- Reciclable
- Aprobado para su uso en productos en contacto con productos alimentarios, médicos y cosméticos
- Alta rigidez y dureza
- Alta resistencia a esfuerzos permanentes

1.3.2 Resistencia química del PET. Presenta buena resistencia en general a grasas, aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos, alcoholes y posee poca resistencia a solventes halogenados, aromáticos y cetonas de bajo peso molecular.²²

1.3.3 Métodos de fijación en PET. Existen varios métodos reportados en artículos y bibliografía, los más utilizados son los siguientes

1.3.3.1 Ataque con agentes ácidos al PET. Meichtry propone fijar dióxido de titanio en botellas de PET mediante la acidificación de una suspensión de TiO₂ en agua con ácido perclórico (HClO₄) hasta un pH de 2.5²³ luego tomar de la suspensión una pequeña muestra e introducirla en las botellas, de esta manera se afecta la superficie interna y se fija el TiO₂. Este trabajo ha sido citado y adaptado, utilizando como agente acidificante el ácido nítrico (HNO₃)²⁴ en donde utilizan la misma metodología de Meichtry y analizan la variación el pH de la suspensión; en otro estudio adaptan el método de Meichtry y evalúan con agentes diferentes al HClO₄, con agentes como el acetato de sodio obtenido de la reacción entre vinagre

¹⁹ Ibid. P. 25

²⁰ Notas de clase; Polímeros, Universidad de América.

²¹ Ibid. p. 25

²² [Anónimo]PET | Tecnología De Los Plásticos. PET | Tecnología de los Plásticos. 2011.

²³ MEICHTRY Jorge M.et al., Low-cost TiO₂ photocatalytic technology for water potabilization in plastic bottles for isolated regions. Photocatalyst fixation, En: Unidad de Actividad Química, Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina .2007. p.1-21

²⁴ FOSTIER Anne Helene., et. al., Arsenic removal from water employing heterogeneous photocatalysis with TiO₂ immobilized in PET bottles. En: Chemosphere journal Instituto de Quimica, Universidad de Estadual de Campinas, Brasil 2007.p 320-323 24

y bicarbonato de sodio, EDTA, ácido tartárico entre otros, justificando que el HClO_4 es una sustancia peligrosa y corrosiva²⁵

1.3.3.2 Agente ligante. Este método consiste en adicionar una sustancia que cumpla la función de unir el catalizador en el sustrato. Se disuelve el agente ligante en un solvente generalmente orgánico y se sumerge el sustrato con el catalizador, posteriormente se seca y se somete a un tratamiento térmico^{26 27}.

1.3.3.3 Magnetron sputtering. Es un método de deposición física que significa pulverización catódica por medio de magnetron. Si un sólido o líquido se bombardea con partículas atómicas altamente energéticas (iones generados a partir de impactos de electrones energéticos con átomos de gas de la atmósfera), es posible adquirir la energía suficiente gracias a las colisiones para escapar de la superficie²⁸ es decir, se somete a un blanco (catalizador), a un bombardeo con iones altamente energéticos en el interior de un dispositivo por medio de un medio gaseoso (Argón).²⁹ El procedimiento se realiza en dispositivos a alta frecuencia³⁰ y en dispositivos de corriente directa y alto poder de impulso eléctrico³¹

1.3.3.4 Método Sol gel. Es un método importante para formar partículas extremadamente finas de tamaño uniforme.³² Un procedimiento sol-gel típico parte de un alcóxido metálico, estos alcoholes contienen grupos orgánicos unidos a un átomo metálico a través de átomos de oxígeno, se producen cuando el metal reacciona con un alcohol unido directamente a un carbón³³

²⁵ MORGAN Eric Richard. Solar water purification with PET bottles coated with titanium dioxide using improved binding agents, partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science energy engineering, solar, En: university of massachusetts lowell, USA 2008.p.19-90

²⁶ MARÍN Juan M., et al., Soporte de Nuevas Películas de TiO_2 y $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ sobre Gránulos de Poliéster para Aplicación en Fotocatálisis, Universidad de Antioquia, Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, En: revista información tecnológica. Medellín, Colombia.2008. p 11.

²⁷ GRANDA Fidel, et al., Soporte Y Caracterización De Películas De TiO_2 Sobre Recubrimientos Poliméricos Con Actividad Fotoinducida. En: Scientia et Technica Año XIII .Universidad Tecnológica de Pereira., 2007.p 245

²⁸ NIETO E., et al., Películas delgadas: fabricación y aplicaciones, Instituto de Cerámica y Vidrio, En: boletín informativo, artículo de revisión. CSIC. Arganda del Rey. Madrid, España, 1994. p 255

²⁹ Diana Carolina Barrera Toca y Cristian Andres Monroy Leyton. Evaluación Del Método De Fijación De TiO_2 Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de America, 2015.

³⁰ AMOR S. Ben, et al. Photoprotective titania coatings on PET substrates, Surface and Coatings Technology journal. Universite´ Blaise Pascal, France, 1997, pp 63

³¹ TWU M., et al., Properties of TiO_2 films deposited on flexible substrates using direct current magnetron sputtering and using high power impulse magnetron sputtering, Polymer Degradation and Stability journal, Department of Mechatronic Engineering, National Taiwan Normal University, Taiwan, 2015 pp 2.

³² Diana Carolina Barrera Toca y Cristian Andres Monroy Leyton. Evaluación Del Método De Fijación De TiO_2 Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de America, 2015.

³³ BRONW Theodore, química la ciencia central, ed 11, Pearson, prentice hall 2009. p. 494.

Existen varios trabajos en donde utilizan el método sol-gel para soportar el TiO₂ sobre PET. La diferencia entre ellos se observa en los cambios de parámetros y precursores utilizados al igual que los pretratamientos realizados al sustrato para mejorar la fijación del semiconductor.³⁴³⁵³⁶

³⁴ NAVANEETHA K. Pandiyaraj, Effect of dc glow discharge plasma treatment on PET/TiO₂ thin film surfaces for enhancement of bioactivity. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces journal, Department of Physics, Bharathiar University, Coimbatore 2010 p.54.

³⁵ NAVANEETHA K. Pandiyaraj, PERNI Stefano. Influence of operating parameters on surface properties of RF glow discharge oxygen plasma treated TiO₂/PET film for biomedical application. Department of Physics, Sri Shakthi Institute of Engineering and Technology, L&T by pass, Chinniyam Palayam (post), India 2013, pp 310.

³⁶ YANG Jae-Hun, et al., TiO₂ thin-films on polymer substrates and their photocatalytic activity. En: Thin Solid Films journal. Division of Nanoscience and Department of Chemistry, Ewha Womans University, Seoul, South Korea 2005. p 267.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE FIJACIÓN DE TiO₂/CuO EN PET

Existen varios métodos para fijar TiO₂ en PET, Magnetron sputtering³⁷, sol gel³⁸, agente ligante, laser, plasma, entre otros métodos reportados en las referencias bibliográfica, sin embargo, es necesario evaluar estos métodos para la fijación de TiO₂ cuando se le realiza una modificación, en este caso de óxido de cobre.

Tabla 1. Métodos para soportar TiO₂ sobre Polietileno Tereftalato.

Método	Reactivos	Equipos
Sputtering ³⁹	Argón TiO ₂ compacto Isopropóxido de titanio	Unidad de pulverización catódica Bomba de vacío
Sol-gel ⁴⁰	Ácido nítrico TiCl ₄ Agua desionizada TiO ₂	Plancha de agitación Mufia
Agente ligante (A) ⁴¹	Cloruro de metileno Tolueno Silicona líquida	Plancha de agitación
Agente ligante (B)	HClO ₄ TiO ₂ Agua desionizada	Potenciómetro Ultrasonido

Fuente: BARRERA TOCA Diana Carolina y MONROY LEYTON Cristian Andres. Evaluación Del Método De Fijación De TiO₂ Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Trabajo de grado. Fundación Universidad de America, 2015. p.29

³⁷ TWU M., et al., Properties of TiO₂ films deposited on flexible substrates using direct current magnetron sputtering and using high power impulse magnetron sputtering, Polymer Degradation and Stability journal, Department of Mechatronic Engineering, National Taiwan Normal University, Taiwan, 2015 pp 2.

³⁸ NAVANEETHA K. Pandiyaraj, PERNI Stefano. Influence of operating parameters on surface properties of RF glow discharge oxygen plasma treated TiO₂/PET film for biomedical application. Department of Physics, Sri Shakthi Institute of Engineering and Technology, L&T by pass, Chinniyam Palayam (post), India 2013, pp 310.

³⁹ TWU. Op. Cit., p.2

⁴⁰ NAVANEETHA K. Pandiyaraj, Effect of dc glow discharge plasma treatment on PET/TiO₂ thin film surfaces for enhancement of bioactivity. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces journal, Department of Physics, Bharathiar University, Coimbatore 2010 p.54.

⁴¹ MARÍN Juan M., et al., Soporte de Nuevas Películas de TiO₂ y TiO₂/SiO₂ sobre Gránulos de Poliéster para Aplicación en Fotocatálisis, Universidad de Antioquia, Grupo Procesos Fisicoquímicos Aplicados, En: revista información tecnológica. Medellín, Colombia.2008. p 11.

De acuerdo con la información encontrada en Merck sobre los precios de los reactivos y teniendo en cuenta el trabajo de grado de Diana Barrera y Cristian Monroy⁴² se realiza la tabla 2. En donde se coloca un valor de 1 a 5 según el valor del reactivo, la facilidad del proceso, la disponibilidad de reactivos o de equipos para realizar el proceso. De acuerdo con lo anterior la sumatoria de dichos valores define cual es el método adecuado para realizarse y aquel que obtenga el menor valor será el elegido.

Tabla 2. Tabla de decisión de proceso.

N	Método	Reactivos	Equipos	Sumatoria
1	4	4	5	13
2	3	5	2	10
3	1	3	1	5
4	2	4	2	8

Fuente: elaboración propia

El primer método de sputtering resulta ser un método con complicaciones para realizarse no tanto por el procedimiento sino por el equipo que es necesario utilizar (unidad pulverizadora) y el costo de los reactivos Argón y isopropoxido de titanio el cual tiene un valor de 355,000⁴³ por litro de solución; el método de Sol-gel tiene como complicación los reactivos a utilizar puesto que estos tiene precios elevados y de difícil adquisición, un litro de ácido nítrico tiene un valor de 281.000⁴⁴ y un litro de TiCl₄ tiene un valor de 526.000⁴⁵; el cuarto método requiere de la utilización de ácido perclórico el cual tiene un precio de 921.000⁴⁶ por litro y puede llegar a tener un valor de 1.021.000⁴⁷ por litro de solución, razón por la cual el método para realizar la fijación de dióxido de titanio en PET es el método número tres de agente ligante, el cual utiliza materiales como silicona, tolueno, cloruro de metilo el cual tiene un

⁴² Diana Carolina Barrera Toca y Cristian Andres Monroy Leyton. Evaluación Del Método De Fijación De TiO₂ Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de America, 2015.

⁴³ Elementos Quimico Ltda. Titanio (Iv) Isopropoxido 95%. [Consultado el 15 noviembre 2018]. Disponible en: <http://www.elementosquimicos.com.co/titanio-iv-isopropoxido-95.html>

⁴⁴ Merck millipore. Ácido nítrico 69% | 101799. [Consultado el 15 Noviembre 2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Nitric-acid-690-0,MDA_CHEM-101799#anchor_orderingcomp

⁴⁵ Merck millipore. Titanio(IV) cloruro CAS 7550-45-0 | 812382. [0]. [Consultado el 15 Noviembre de2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/TitaniumIV-chloride,MDA_CHEM-812382#anchor_orderingcomp

⁴⁶ Merck millipore. Ácido perclórico 60% | 100518. [0]. [Consultado el 15 de noviembre de2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Perchloric-acid-600-0,MDA_CHEM-100518#anchor_orderingcomp

⁴⁷ Merck millipore. Ácido perclórico 70-72% | 100519. [0]. [Consultado el 15 de Noviembre de2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Perchloric-acid-70-720-0,MDA_CHEM-100519

valor de 233.000⁴⁸ por litro y equipos de fácil adquisición en comparación con los otros métodos.

2.2 PRE-TRATAMIENTO DEL POLÍMERO

Para el lavado adecuado del poli(etileno tereftalato) se utilizan agentes con diferentes polaridades: acetona, isopropanol, etanol y agua en baño de ultrasonido por 15 min para garantizar la remoción de contaminantes y grasas en el Poli(etileno tereftalato) y con ello lograr una mejor adhesión en la superficie del polímero (ver anexo B).

2.3 INMOVILIZACIÓN DEL SEMICONDUCTOR EN PET

A continuación, se describe la metodología para inmovilizar TiO₂/CuO en láminas de poli(etileno tereftalato) por medio de agente ligante.

2.3.1 Pre-Experimentación. Por medio de revisión bibliográfica y anteriores trabajos de grado del grupo se obtuvieron datos de cantidades de TiO₂/silicona:

Tabla 3. Datos encontrados para experimentación⁴⁹

% TiO ₂ (p/p)	% silicona (p/p)	solvente	Tratamiento térmico	Soporte
7	1,2	Cloruro de metileno	100°C 1 hora	Gránulos de PET

Fuente: elaboración propia

Tras el análisis y la variación de las cantidades del semiconductor se observó que a mayor cantidad de TiO₂ y poca cantidad de silicona el semiconductor se desprende del soporte y por el contrario a mayor cantidad de silicona y poca cantidad de TiO₂ la superficie del semiconductor queda cubierta disminuyendo la actividad fotocatalítica, por otro lado si se supera la temperatura vítrea del polímero este tiende a deformarse impidiendo que la deposición sea homogénea en la película, además de observar que el cloruro de metilo deforma y cristaliza el PET generándole pérdida de resistencia mecánica.

⁴⁸ Merck millipore. Diclorometano CAS 75-09-2 | 106454. [0]. [Consultado el 15 de noviembre de 2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Dichloromethane,MDA_CHEM-106454

⁴⁹ Diana Carolina Barrera Toca and Cristian Andres Monroy Leyton. Evaluación del método de fijación de TiO₂ sobre polímero PET para la aplicación en un fotorreactor. Fundación Universidad de America, 2015. p. 31

2.3.2 Experimentación.

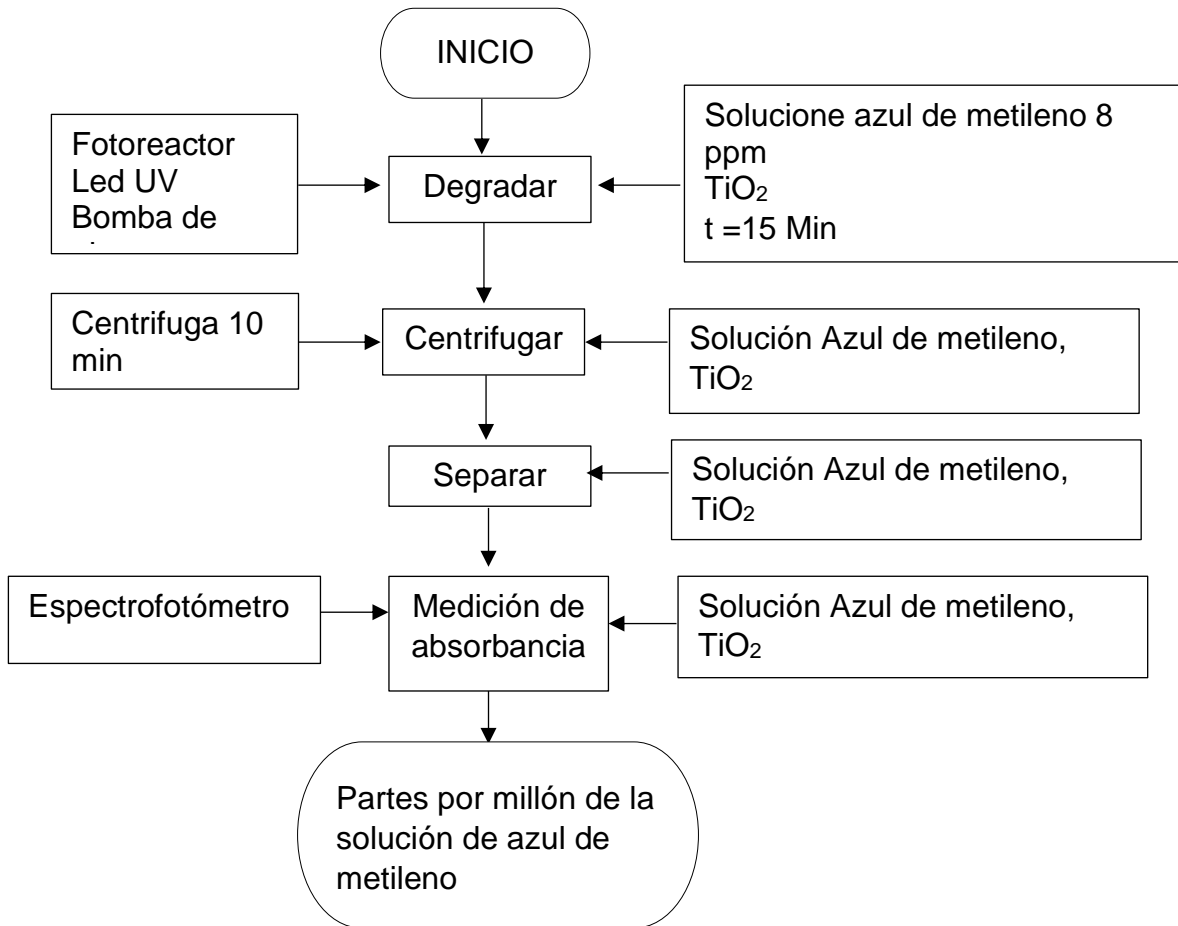
2.3.2.1 Materiales empleados para la elaboración de la mezcla.

- **Dióxido de titanio.** HOMBITAN LW-S Producido por la empresa Sachtleben, estructura cristalina Anatasa como fotocatalizador. (Ver Anexo A)
- **Sulfato de cobre (III) CuSO_4 .** Compuesto solido cristalino de color azul con solubilidad de 20,3 g/100mL a 20°C⁵⁰; utilizado como precursor de óxido de cobre.
- **Isopropanol.** Solvente utilizado para la suspensión de TiO_2/CuO
- **Silicona.** Silicona líquida marca Merletto ®
- **Acetona.** Solvente con pureza de 99% grado reactivo.
- **Cloruro de metilo.** Solvente con pureza de 99% grado reactivo.
- **Poli(etileno tereftalto) (PET).** Material de soporte

2.3.2.2 Selección de dióxido de titanio. Para la selección del dióxido de titanio compacto que se utiliza se agrega una pequeña cantidad aproximada de 0,05g de los diferentes dióxidos de titanio (Hombitan, Degussa N, Degusa B) en una solución de azul de metileno de 8 partes por millón esta solución se ilumina con luz ultravioleta y se le coloca aireación continua, se espera 15 min aproximadamente, transcurrido el tiempo se coloca parte de la solución azul de metileno/ TiO_2 en un tubo falcón, se centrifuga por 10 minutos, el sobrenadante se coloca en centrifugación por 10 minutos y terminada la centrifugación se le realiza lectura en espectrofotómetro y de esta manera es posible observar cual TiO_2 compacto será el mejor fotocatalizador. (Diagrama 1).

⁵⁰ Merck. Cobre(II) sulfato
. [Consultado el 15 de Noviembre2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/CopperII-sulfate,MDA_CHEM-102792

Diagrama 1. Determinación de TiO_2 con mayor actividad fotocatalítica



Fuente: elaboración propia

2.3.2.3 Tratamiento térmico TiO_2 . Debido a que el PET no puede superar la temperatura de 100°C antes de realizar la fijación es necesario realizar un tratamiento térmico al Dióxido de Titanio, teniendo en cuenta que el dióxido de titanio tiene mayor actividad fotocatalítica en la fase cristalina anatasa y al sobrepasar 700°C la fase cristalina cambia, con ello se toma como rango máximo 700°C ⁵¹, por otro lado en el trabajo de grado de David Bolaños y Nicolas Pacheco pertenecientes al grupo de materiales fotoactivos evaluaron la temperatura que tiene mejor actividad fotocatalítica en la inactivación de *E. coli* en la cual encontraron que a 550°C se obtuvo una inactividad del 99% lo cual nos da un punto de partida para analizar las temperaturas adecuadas para realizar la activación del dióxido de

⁵¹ Wilmer Y. Córdoba, et al. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y ELECTRÓNICAS DE LA FASE (P 4(2)/nm) DEL MnO_2 . En: AVANCES EN CIENCIAS E INGENIERÍA. Jan 1, vol. 3, no. 4, p. 125-130

titanio⁵²; por esto se realiza una variación de temperatura entre un rango de 500°C a 700°C por dos horas de calcinación, luego se realizó variación del tiempo de calcinación a una temperatura constante (1h, 2h, 3h, 4h) con el fin de encontrar que tiempo de calcinación va a mostrar mejores resultados a la hora de realizar la remoción de azul de metileno y que a su vez la temperatura no afecte la estructura cristalina del dióxido de titanio. De esta manera se puede definir las condiciones para realizar y modificación de la suspensión (Anexo E).

2.3.2.4 Selección de solventes. Como se mencionó anteriormente el cloruro de metilo es un solvente que afecta al PET, por consiguiente, es necesario buscar otro solvente que no lo afecte, teniendo en cuenta la solubilidad de Hildebrand (δ) de los compuestos involucrados (ver tabla 4) y teniendo en cuenta antecedentes en el grupo Materiales Fotoactivos se encontró los diferentes solventes que pueden ser utilizados gracias a su solubilidad y a la temperatura de ebullición de los mismos (ver tabla 5).

Tabla 4. Parámetros de solubilidad de los compuestos involucrados inicialmente

Compuestos	δ (MPa ^{0,5}) ⁵³
Silicona	15,6
PET	20,8
Cloruro de metilo	20,2

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Parámetros de solubilidad y temperatura de ebullición de solventes propuestos.⁵⁴

Solventes	δ (MPa ^{0,5}) ⁵⁵	Temperatura ebullición (°C) de
Acetona	19,7	56,2
Tolueno	18,3	111
Acetato de butilo	17,3	126

Fuente: elaboración propia

⁵² David Andrés Bolaños García and Nicolás Pacheco Triana. Evaluación Del Efecto De La Temperatura De Calcinación Sobre Mezcla TiO₂/CuOx Para La Inactivación Fotocatalítica De E. coli En Presencia De Luz Visible. Fundación Universidad de América, 2014. p.

⁵³ BURKE, John. Solubility Parameters: Theory and Application. En: THE OAKLAND MUSEUM OF CALIFORNIA. august.vol. 3, p. 13-58

⁵⁴ Diana Carolina Barrera Toca y Cristian Andres Monroy Leyton. Evaluación Del Método De Fijación De TiO₂ Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de América, 2015. p. 33

⁵⁵ BURKE, John. Solubility Parameters: Theory and Application. En: THE OAKLAND MUSEUM OF CALIFORNIA. august.vol. 3, p. 13-58

Teniendo en cuenta que la temperatura de transición vítrea del Polietileno Tereftalato es de aproximadamente 70°C⁵⁶ la mejor opción a utilizar es la acetona puesto que esta tiene una temperatura de ebullición menor a la del PET, evitando de esta manera posibles deformaciones de la lámina de PET por aumento de temperatura.

2.3.2.5 Suspensión. La suspensión para la deposición de películas se realizó manejando proporciones de Solvente Acetona/Cloruro de metileno de 4:1 respectivamente ya que se encontró que en esta proporción el PET no se ve afectado por el cloruro de metileno y se evita la deformación del mismo ⁵⁷; por otro lado, la proporción de cantidad de TiO₂/Silicona que se manejó fue una proporción de 54% de TiO₂ y 46% de silicona, proporción que nos asegura que la silicona no genera recubrimiento al TiO₂ evitando su actividad fotocatalítica.

2.3.2.6 Protocolo de fijación de TiO₂. Para la fijación del dióxido de titanio sobre la lámina de PET se mezcló el agente ligante (silicona) y el solvente (acetona/cloruro de metileno) en un Beaker, se lleva a una plancha de agitación magnética durante 30 min agregando lentamente el TiO₂ para evitar aglomeraciones, una vez terminado el tiempo de agitación la mezcla se coloca en la lámina previamente adecuada. (ver anexo C)⁵⁸.

2.3.2.7 Mezcla TiO₂/CuO. El procedimiento utilizado para la modificación de dióxido de titanio se realizó por la técnica Dip coating, técnica que se utiliza industrialmente para realizar recubrimientos de herramientas u objetos cuyas superficies necesitan protección a otras superficies, sustancias, materiales entre otros; ayudando así a que su vida útil sea más larga, duradera y eficiente. Por otro lado, la técnica de Dip coating se realiza por medio de la inmersión del sustrato (película PET/TiO₂) dentro de la solución de recubrimiento, en este caso Sulfato de cobre (CuSO₄), a una velocidad constante. Se deja sumergida por un minuto y posteriormente se saca de la solución a velocidad constante, realizando así la deposición de maneja uniforme sobre la película. Posteriormente se realiza la evaporación del solvente en una mufla, con la evaporación se deposita el CuO modificando la película de PET/TiO₂/CuO. (ver Anexo D).

2.3.2.8 Prueba de resistencia. Se llevó a cabo una prueba de adhesión y posteriormente de resistencia al agua; este procedimiento se lleva a cabo tomando un trozo de cinta, el cual es colocado sobre la película y posteriormente retirado en un solo movimiento, de esta manera se observa la cantidad de TiO₂/CuO que se desprende de la película quedando en la cinta y cuanta queda adherida al PET; para

⁵⁶ Información suministrada en clase de polímeros, 17 de agosto de 2018

⁵⁷ Diana Carolina Barrera Toca y Cristian Andres Monroy Leyton. Evaluación Del Método De Fijación De TiO₂ Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de América, 2015. p. 33

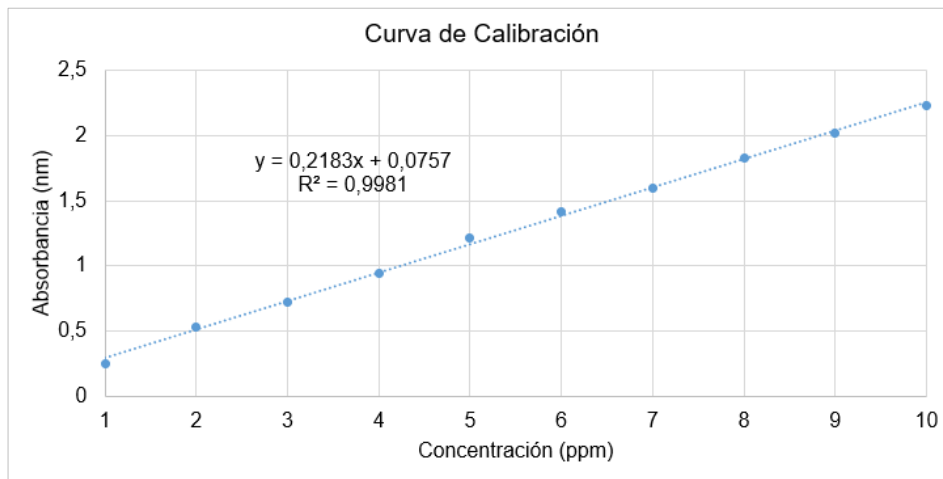
⁵⁸ Ibid. p. 65. Anexo D.

la resistencia al agua, se coloca la película en un beaker con suficiente agua para cubrir la película y se agita, de esta manera se determina la cantidad de TiO_2/CuO desprendido de la película y la resistencia que tiene la película al agua.

2.4 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS PELÍCULAS REALIZADAS

2.4.1 Curva de calibración para el azul de metileno a 665 nm.

Grafica 1. Curva de calibración de azul de metileno a 665 nm



Fuente: elaboración propia

Luego de finalizar la elaboración de las películas fue necesario verificar que estas tengan actividad fotodegradativa; con este fin se realizó inicialmente una curva de calibración con soluciones preparadas de azul de metileno de 1 a 10 ppm (partes por millón), de esta manera y gracias a la ecuación de la recta que nos proporciona la curva de calibración, fue posible conocer las concentraciones en el proceso de degradación; la curva tiene un comportamiento altamente lineal como es de esperarse y teniendo concordancia con la ley de Lambert-Beer.

2.4.2 Fuente de luz. La fuente de luz utilizada fueron leds de alta potencia de 3W conectados a un disipador y una resistencia de 1,2 ohms con una tolerancia del 5%, de tal manera que se evite el calentamiento del led.

2.4.3 Reactor. Se utilizó el modelo de reactor utilizado por el grupo de investigación de materiales fotoactivos, este tiene una capacidad de 20 mL, la tapa del reactor tiene tres orificios con el tamaño requerido para permitir la entrada de la manguera de aire, el soporte para la película y el led de 3W.

Figura 4. Esquema del montaje de degradación.



Fuente: RODRIGUEZ HERNANDEZ Karen Daiana y CORTES ARIAS Andres Felipe. Evaluación De La Actividad Fotocatalítica Del Dióxido de Titanio Sensibilizado Con Una Base De Mannich Para La Degradación De Azul De Metileno. Trabajo de grado. Fundación Universidad de América, 2017. p. 35.

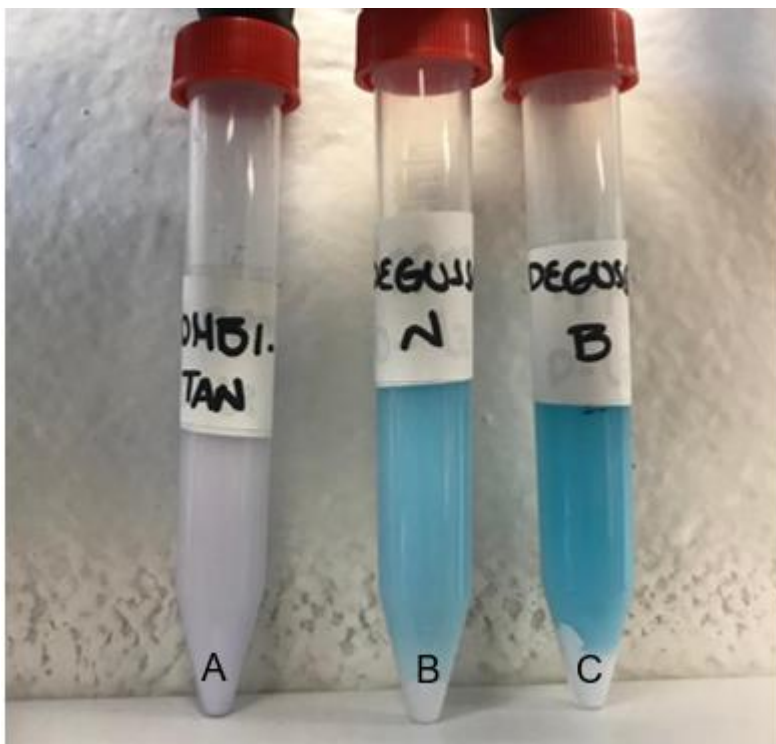
2.4.4 Fuente de agitación. Se utilizó una bomba de aire Power Life P-500. Con el fin de tener una fuente oxidativa o presencia de oxígeno constantemente, ayudando a generar una agitación constante dentro del reactor, manteniendo homogenizada la solución y ayudando el contacto con la superficie de la película.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 ELECCIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO

3.1.1 Determinación de Dióxido de Titanio a utilizar. Al realizar el procedimiento en donde se comparan tres Dióxidos de Titanio en las mismas condiciones de temperatura, concentración y la misma cantidad de tiempo, se encontró que el Dióxido de Titanio Hombitan fue el que removió mayor cantidad el azul de metileno a comparación de los Degussa utilizados (Figura 4). Este proceso se evidencio de manera visible y por medio de la medición de absorbancia de las soluciones.

Figura 5. Remoción azul de metileno



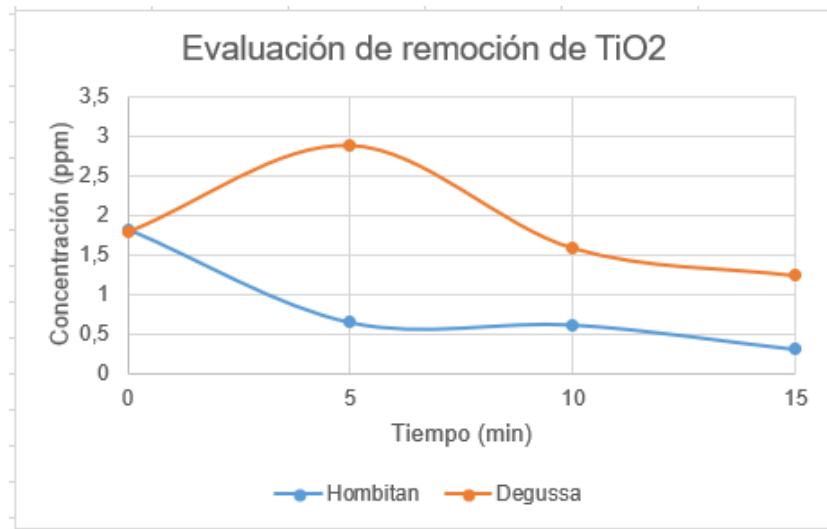
Fuente: elaboración propia

Comparación visual de remoción del dióxido de titanio A: Hombitan, B: Degussa N, C: Degussa B.

Como se observa en la figura 4. Visiblemente el dióxido de titanio Hombitan fue el que removió la mayor cantidad de azul de metileno, removiendo el 86%, mientras de los dióxidos de titanio Degussa removieron al rededor del 32% de azul de

metileno, (grafica 2.) razón por la cual se eligió el Dióxido de titanio Hombitan para realizar los procedimientos de fijación y modificación.

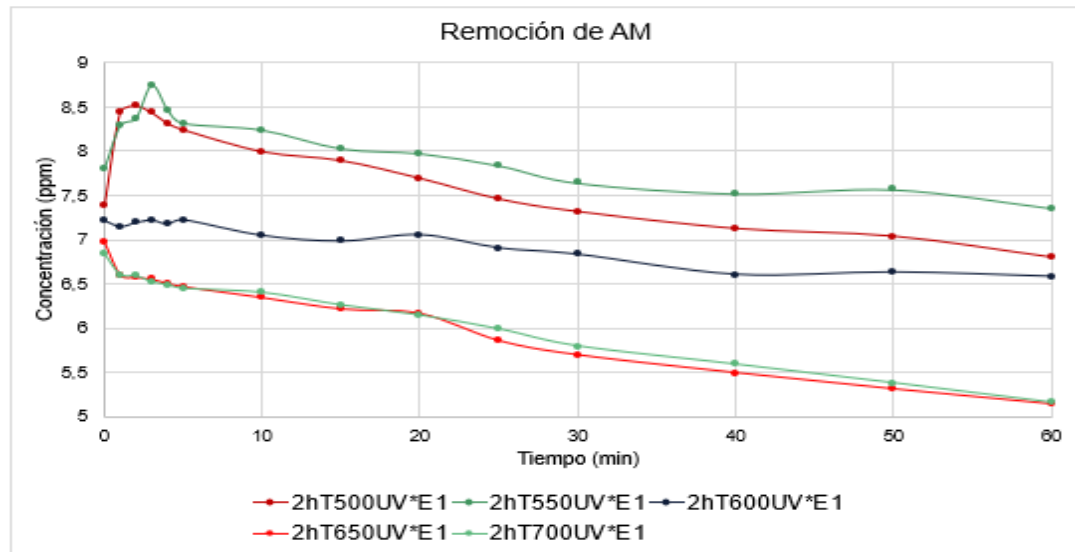
Grafica 2. Remoción de azul de metileno con diferentes TiO_2



Fuente: elaboración propia

3.1.2 Tratamiento térmico. La temperatura de calcinación del Dióxido de titanio que tuvo mayor remoción de azul de metileno luego del tratamiento térmico fue a 650 °C con un porcentaje de calcinación del 26,33% (grafica 3. y tabla 6.) y un tiempo de calcinación de 3 horas con un porcentaje de calcinación del 31,52% (grafica 4. y tabla 7.); razón por la cual se tomó como punto de partida dicha temperatura (650°C) por 3 horas para realizar la fijación y modificación del dióxido de titanio.

Grafica 3. Remoción de azul de metileno a diferentes temperaturas y tiempo constante.



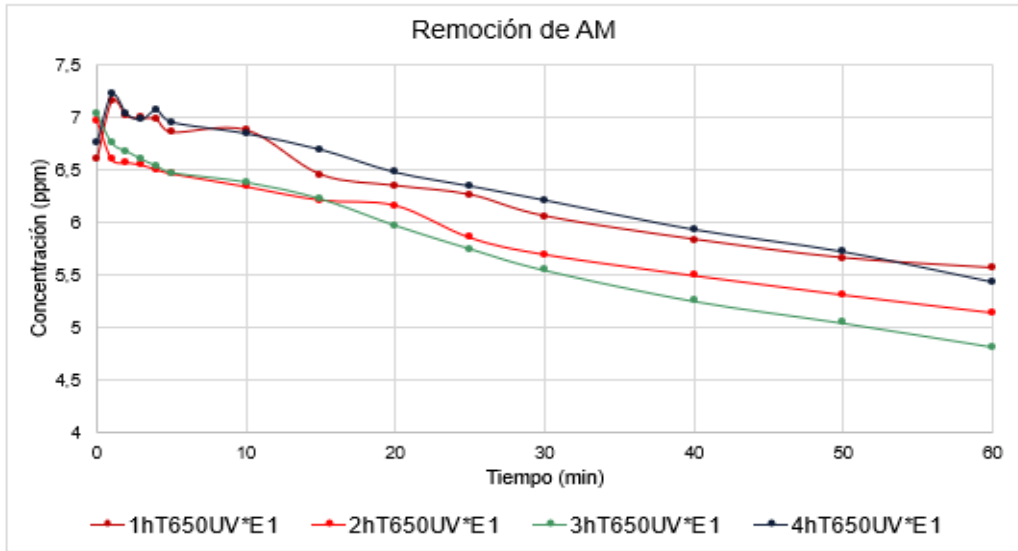
Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Porcentaje de degradación con tiempo constante.

Temperatura °C	% Degradación
500	7,88%
550	5,75%
600	8,82%
650	26,33%
700	24,62%

Fuente: elaboración propia

Grafica 4. Remoción de azul de metileno a diferente tiempo y temperatura constante.



Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Porcentaje de degradación con temperatura constante.

Tiempo Hora	% Degradación
1	15,76%
2	26,32%
3	31,52%
4	19,74%

Fuente: elaboración propia

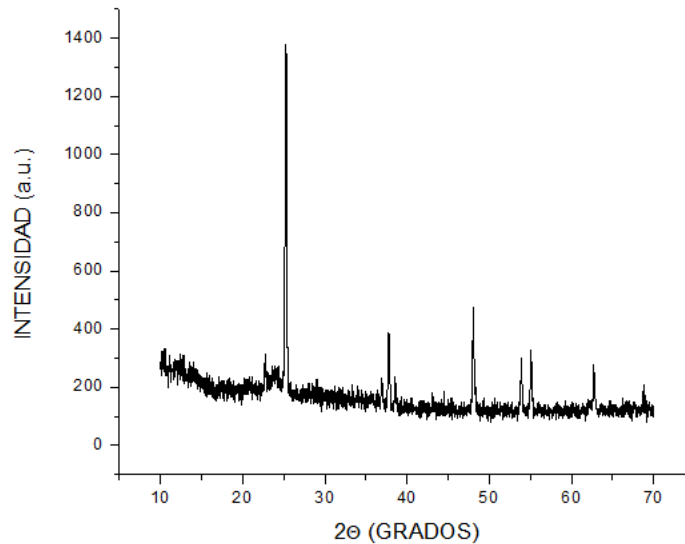
3.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y ESTRUCTURAL

Las películas modificadas con TiO_2/CuO a las cuales se les realizó el proceso de caracterización son aquellas que tuvieron los mejores resultados de degradación de azul de metileno, con el fin de observar y analizar solamente aquellas que cumplen con el cometido final.

3.2.1 Caracterización estructural por difracción de rayos X (DRX). Por medio de la caracterización por difracción de rayos X (DRX) se observa la mayor presencia de cristales de TiO_2 en fase anatasa en 25,28; 48,6; 62,72 y la mayor presencia de

cristales de CuO en 37,76; 53,96; 55,08 mostrando de esta manera la presencia del precursor sobre la película como era de esperarse.

Grafica 5. Análisis DRX de película de TiO₂/CuO sobre PET

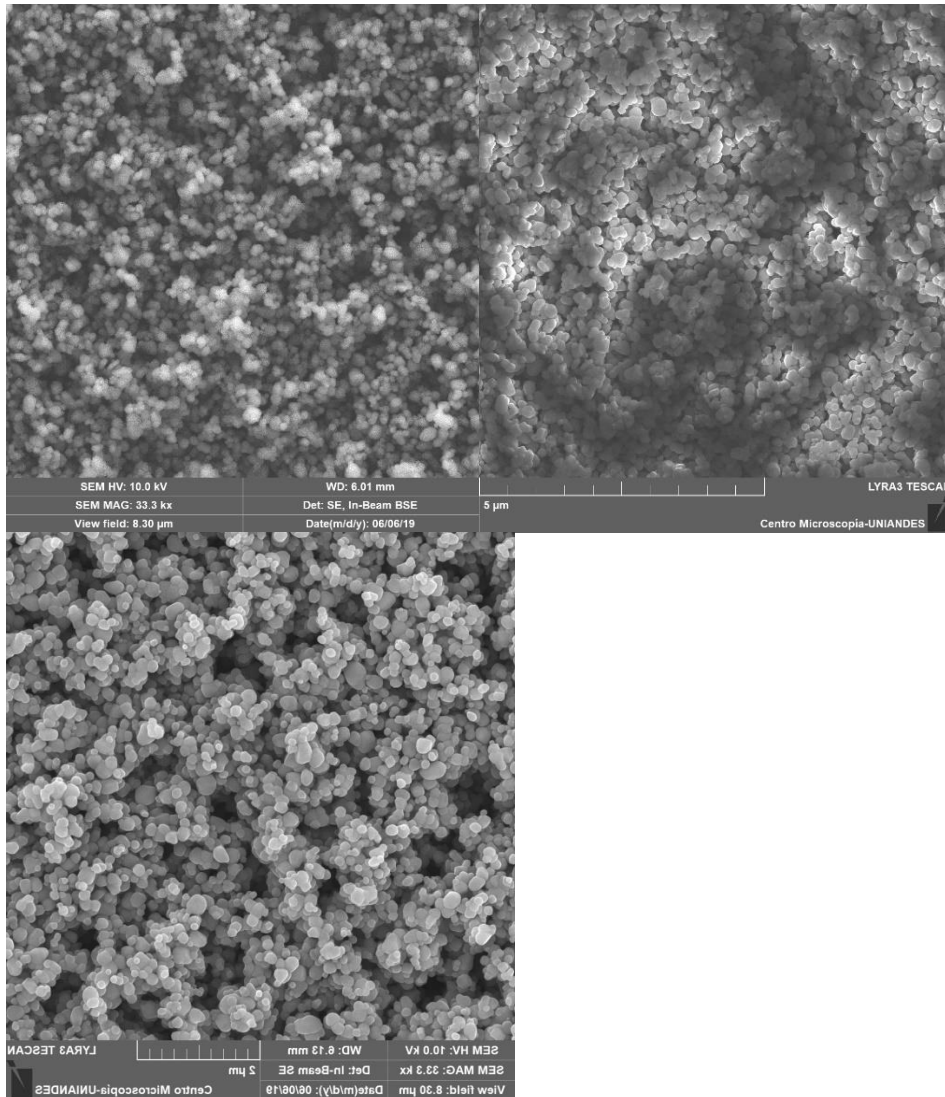


Fuente: elaboración propia

3.2.2 Caracterización morfológica con un microscopio electrónico de barrido (SEM). La caracterización morfológica se realizó con un microscopio electrónico de barrido de electrones en una película de TiO₂/CuO sobre PET; sobre la cual fue necesario realizar un recubrimiento de partículas de oro ya que este procedimiento se realiza en alto vacío y de esta manera permitir la conducción del haz de electrones. Estos electrones se bombardean a un área pequeña y determinada de la película, los electrones son absorbidos y posteriormente convertidos en imagen.⁵⁹

⁵⁹ Centro microscopia UNIANDES

Grafica 6. Caracterización SEM de película de TiO₂/CuO sobre PET



Fuente: elaboración propia: en base al centro de microscopia de la universidad de los andes

De las anteriores imágenes se puede analizar que la mezcla presenta una película uniforme con presencia de aglomeraciones, estas aglomeraciones esto se deben a la silicona presente en la película, sin embargo, se observa la forma nanopartículas del TiO₂ sobre la superficie, razón por la que permite la actividad fotocatalítica.

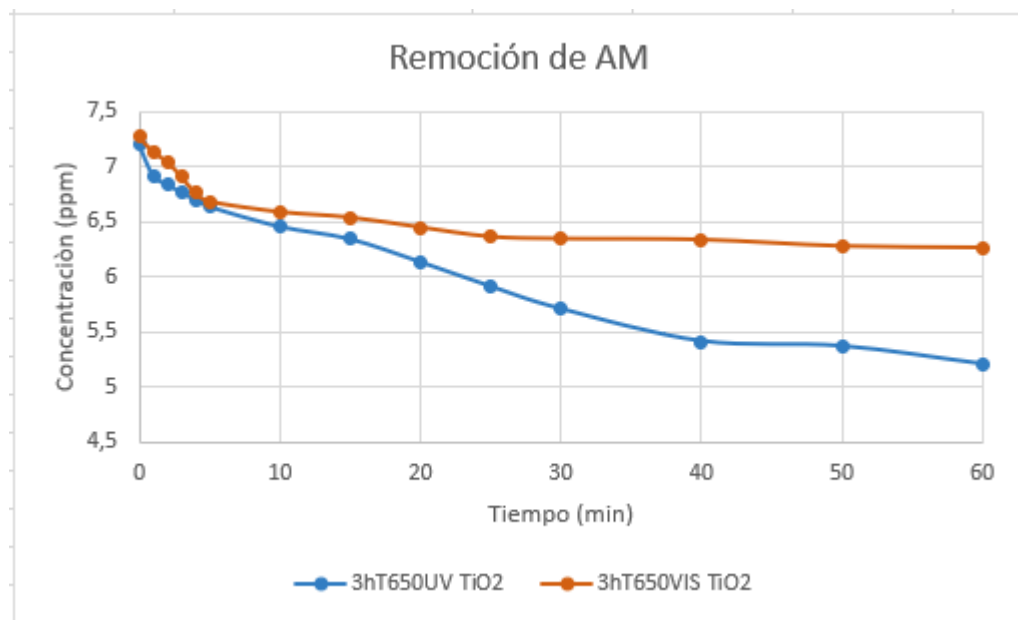
3.3 CURVAS DE DEGRADACIÓN DE AZUL DE METILENO

3.3.1 Curvas de degradación de azul de metileno con TiO₂ inmovilizado en láminas de PET. Inicialmente se realizó degradación de TiO₂ sin modificar para cerciorar de que el método aplicado para la fijación en láminas de PET tiene

actividad fotodegradativa, al igual que verificar que la suspensión realizada se elaboró de manera correcta, para esto se realizó el método de fijación previamente mencionado y fueron irradiadas con luz ultravioleta en una solución de 8 ppm de azul de metileno aproximadamente; para dicho proceso es necesario tener control del proceso de degradación por consiguiente se toman mediciones de absorbancia cada minuto por 5 minutos, luego cada 5 minutos por 25 minutos y posteriormente cada 10 minutos por 30 minutos completando una hora de degradación. Si las películas no tienen actividad fotodegradativa se debe realizar una nueva suspensión y realizar todo el procedimiento desde su inicio hasta obtener la suspensión adecuada y el método que muestre la actividad fotodegradativa que tiene el TiO₂ por naturaleza.

Como es de esperarse el dióxido de titanio tiene una actividad fotodegradativa mayor al ser irradiado por luz ultravioleta (27,7%) que por luz visible (13,9%), (Grafica 7.), comprobando de esta manera que es necesario realizar una modificación al dióxido de titanio para que este pueda realizar fotodegradación en un rango de luz visible.

Grafica 7. Dióxido de titanio a temperatura y tiempo de calcinación definido.

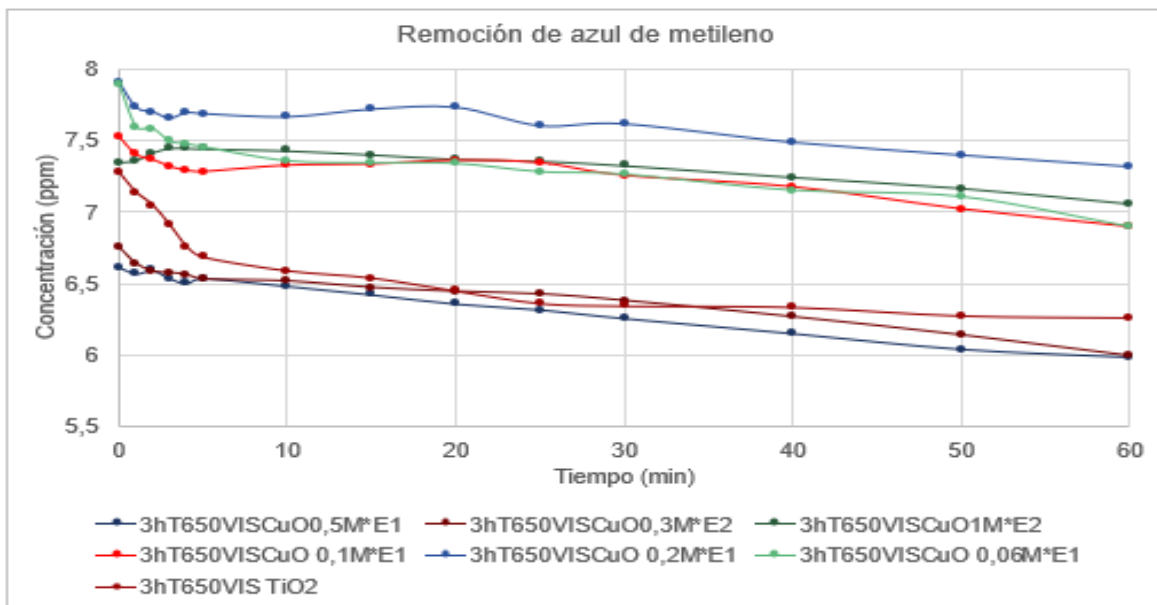


Fuente: elaboración propia

3.3.2 Curvas de degradación de azul de metileno con TiO₂/CuO inmovilizado en láminas de PET. Las películas depositadas sobre PET fueron probadas en una solución de azul de metileno de 8 ppm aproximadamente, en un fotoreactor irradiado con luz visible y ultravioleta durante 60 minutos, se realizó medición de absorbancia cada minuto por cinco minutos luego cada 5 min por 25 minutos y luego cada 10

min hasta completar los 60 minutos, se realizó diferentes concentraciones del precursor (1M, 0,5M, 0,3M, 0,2M, 0,1M y 0,06M) obteniendo las siguientes curvas.

Grafica 8. Remoción de azul de metileno a diferentes concentraciones de precursor en luz visible.



Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Porcentaje de degradación de azul de metileno a diferentes concentraciones de precursor en luz visible.

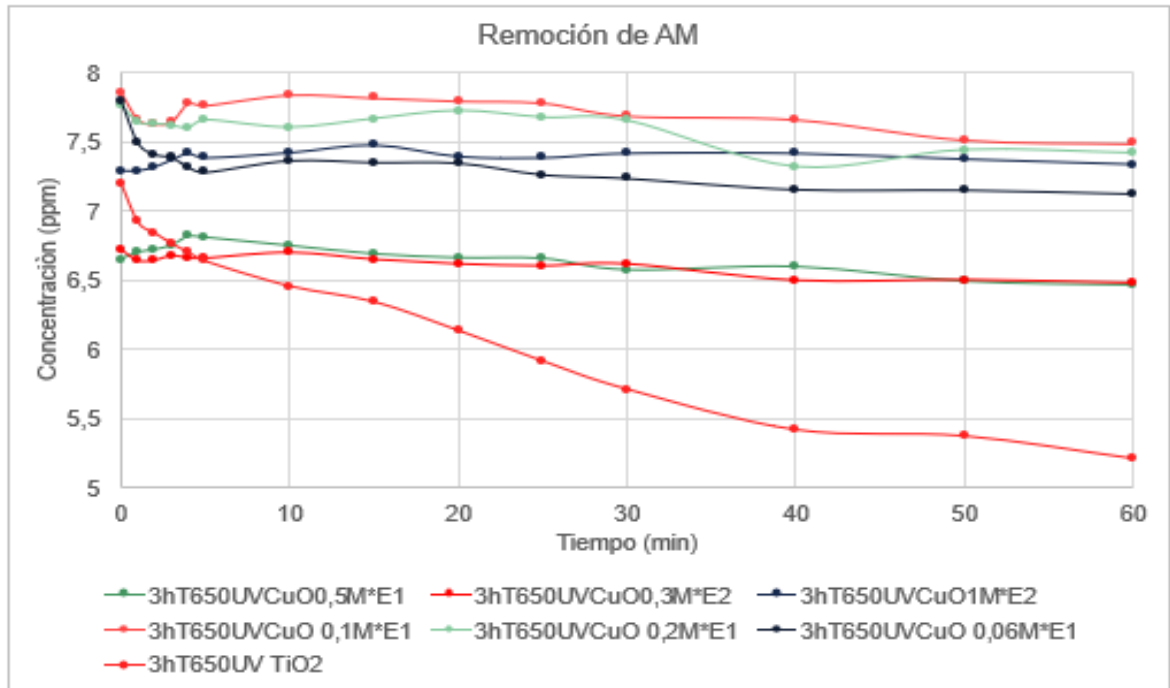
Película Modificada VIS	% Degradación VIS
1 M	0%
0,5 M	9,49%
0,3 M	11,32%
0,2 M	7,50%
0,1 M	8,42%
0,06 M	17,69%
0 M	9,91%

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la gráfica 10 y en la tabla 8 las modificaciones realizadas tienen una actividad fotocatalítica más alta que sin modificar en luz visible, con una concentración de precursor de 0,06M se observa un porcentaje de degradación del 17,69% siendo aproximadamente el doble que el porcentaje de degradación de la película sin modificar (9,91%), esto nos quiere decir que la modificación con oxido

de cobre si amplia en rango de luz sobre el cual trabaja el dióxido de titanio y que este puede ser trabajado sobre lamina de PET.

Grafica 9. Remoción de azul de metileno a diferentes concentraciones de precursor en luz ultravioleta.



Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Porcentaje de degradación de azul de metileno a diferentes concentraciones de precursor en luz ultravioleta.

Película Modificada UV	% Degradación UV
1 M	3,95%
0,5 M	2,82%
0,3 M	3,55%
0,2 M	4,40%
0,1 M	4,72%
0,06 M	8,69%
0 M	27,71%

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en la gráfica 11 y tabla 9 se observa que la actividad fotodegradativa en luz ultravioleta de las películas modificadas tienen una actividad menor que la película sin modificar, sin embargo, si se realiza la comparación entre las películas modificadas, las películas que se sometieron a luz visible tuvieron mayor actividad fotodegradativa que las que fueron sometidas a luz ultravioleta (tabla 10) razón por

la cual se puede decir que a pesar de no superar el porcentaje de degradación de la película sin modificar en luz ultravioleta, si se puede obtener valores con luz visible mejores a los iniciales y de ser posible continuar mejorando el rango de actividad del dióxido de titanio en luz visible.

Tabla 10. Comparación de porcentaje de degradación luz visible Vs luz ultravioleta luego de modificación.

Película Modificada	% Degradación VIS	% Degradación UV
1 M	0%	3,95%
0,5 M	9,49%	2,82%
0,3 M	11,32%	3,55%
0,2 M	7,50%	4,40%
0,1 M	8,42%	4,72%
0,06 M	17,69%	8,69%

Fuente: elaboración propia

4. CONCLUSIONES

- Se obtuvieron películas inmobilizadas en PET utilizando agente ligante, teniendo en cuenta los agentes que pueden afectar las láminas de PET, la variación de temperatura, el tiempo de exposición a una temperatura y su temperatura de transición vítrea, la afectación química y la proporción de actividad fotocatalítica.
- Se verificó la actividad fotocatalítica de las películas inmobilizadas en láminas de PET mediante degradación de azul de metileno desde 8 ppm por un tiempo de 60 min, obteniendo un porcentaje de degradación del 8% en radiación de luz ultravioleta y del 18% en radiación de luz visible; haciendo evidente la modificación y el aumento de degradación en luz visible con respecto a la luz ultravioleta.
- El método de fijación por agente ligante es eficiente puesto que su manipulación es sencilla, de fácil adquisición de materiales y de bajo costo.
- Se observó en la caracterización (SEM) que el dióxido de titanio tuvo una deposición que presenta aglomeraciones gracias a la sílica y los diferentes tamaños de partícula de la mezcla sobre la película.
- Se observó en la caracterización (DRX) la presencia de dióxido de titanio y de óxido de cobre en su composición como era de esperarse.
- La temperatura, tiempo de activación del dióxido de titanio y la concentración del precursor, sulfato de cobre, son características importantes para las películas modificadas TiO_2/CuO sobre PET en la remoción de azul de metileno.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda probar la actividad fotodegradativa de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre inmovilizado en polietileno tereftalato (PET) en otros contaminantes o microorganismos que puedan afectar la salud humana.
- Se recomienda probar la actividad fotodegradativa de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre inmovilizado en polietileno tereftalato (PET) para contaminantes en fase gaseosa.
- Se recomienda probar la actividad foto catalítica de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre inmovilizado en láminas de otros polímeros como poliestirenos, poliaminas, entre otros.
- Se recomienda probar la actividad fotodegradativa de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre por otros métodos de modificación.

BIBLIOGRAFÍA

[Anónimo]PET | Tecnología De Los Plásticos. PET | Tecnología de los Plásticos. 2011.

[Anónimo]Usos del dióxido de titanio | Información sobre la seguridad química. [Consultado el Apr 5,2018]. Disponible en: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/dioxido-de-titanio/>

AMOR S. Ben, et al. Photoprotective titania coatings on PET substrates, Surface and Coatings Technology journal. Universite´ Blaise Pascal, France, 1997, pp 63

BAKER, R. T. K.; PRESTRIDGE, E. B. and MCVICKER, G. B. The Interaction of palladium with alumina and titanium oxide supports. En: JOURNAL OF CATALYSIS. vol. 89, no. 2, p. 422-432

BARRERA Diana Carolina y MONROY Cristian Andres. Evaluación Del Método De Fijación De TiO₂ Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Trabajo de grado. Bogotá. D.C. Fundación Universidad de America, 2015.

BASHIRI, Robabeh, et al. Hydrogen production from water photosplitting using Cu/TiO₂ nanoparticles: Effect of hydrolysis rate and reaction medium. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY. Apr.

BOLAÑOS David Andrés and PACHECO Nicolás. Evaluación Del Efecto De La Temperatura De Calcinación Sobre Mezcla TiO₂/CuOx Para La Inactivación Fotocatalítica De E. coli En Presencia De Luz Visible. Fundacion Universidad de America, 2014. p.

BRONW Theodore, química la ciencia central, ed 11, Pearson, prentice hall 2009. p. 494.

BURKE,John. Solubility Parameters: Theory and Application. En: THE OAKLAND MUSEUM OF CALIFORNIA. august.vol. 3, p. 13-58

CHEN, Y. J.; YUE, T. M. and GUO, Z. N. Fatigue behaviour of titanium/PET joints formed by ultrasound-aided laser welding. En: JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES. Jan.vol. 31, p. 356-363

CLARIZIA Laura, *et al.* Effect of surface properties of copper-modified commercial titanium dioxide photocatalysts on hydrogen production through photoreforming of alcohols. [1]:2017.

DIAZ, Rafael. Óxido Cúprico. [Consultado el Apr 5,2018]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/oxido-cuprico/>

Elementos Quimico Ltda. Titanio (Iv) Isopropoxido 95%. [Consultado el 15 noviembre 2018]. Disponible en: <http://www.elementosquimicos.com.co/titanio-iv-isopropoxido-95.html>

FAKIROV, Stoyko. Polyethylene Terephthalate. En: OLABISI, Olagoke. Handbook of Thermoplastics. 1 ed. Marcel dekker inc, ISBN 0-8247-9797-3. 1997. p. 449-462

FLORES, Elena; PAREDES, Carmen Roque and LUNA, Rómulo Ochoa. Química del color. En: REVISTA DE QUÍMICA. vol. 9, no. 2, p. 99-109

FOSTIER Anne Helene., et. al., Arsenic removal from water employing heterogeneous photocatalysis with TiO₂ immobilized in PET bottles. En: Chemosphere journal Instituto de Quimica, Universidad de Estadual de Campinas, Brasil 2007.p 320-323 24

FUJISHIMA, Akira; RAO, Tata N. and TRYK, Donald A. Titanium dioxide photocatalysis. En: JOURNAL OF PHOTOCHEMISTRY & PHOTOBIOLOGY, C: PHOTOCHEMISTRY REVIEWS. vol. 1, no. 1, p. 1-21

GALVEZ, Julián Blanco, et al. Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: estado del arte. En: CYTED. ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES POR FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.

GARCÉS GIRALDO Luis Fernando; MEJÍA FRANCO Edwin Alejandro y SANTAMARÍA ARANGO Jorge Julián. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: Revista Lasallista De Investigación. vol. 1, no. 1,

Global Water Partnership. New to the Network: GWP Colombia. [1]. Septiembre 13,. [Consultado el Apr 5,2018]. Disponible en: <https://www.gwp.org/en/About/more/news/2017/new-to-the-network-gwp-colombia/>

GRANDA Fidel, et al., Soporte Y Caracterización De Películas De TiO₂ Sobre Recubrimientos Poliméricos Con Actividad Fotoinducida. En: Scientia et Technica Año XIII. Universidad Tecnológica de Pereira., 2007.p 245

GUARIN LLANES, Carolay Yaneth y MERA BENAVIDES, Adriana Consuelo. Fotocatálisis heterogénea con TIO₂ para el tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de bromocresol. En: Revista De Ingenierías: Universidad De Medellín. vol. 10, no. 19, p. 79-88

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendido de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

LEI, Ming, et al. Photocatalytic reductive degradation of polybrominated diphenyl ethers on CuO/TiO₂ nanocomposites: A mechanism based on the switching of photocatalytic reduction potential being controlled by the valence state of copper. En: APPLIED CATALYSIS B: ENVIRONMENTAL. March 1, vol. 182, p. 414-423

MALATO, S., et al. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. 2009.1-59

MARÍN Juan M., et al., Soporte de Nuevas Películas de TiO₂ y TiO₂/SiO₂ sobre Gránulos de Poliéster para Aplicación en Fotocatálisis, Universidad de Antioquia, Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, En: revista información tecnológica. Medellín, Colombia.2008. p 11.

MEICHTRY Jorge M.et al., Low-cost TiO₂ photocatalytic technology for water potabilization in plastic bottles for isolated regions. Photocatalyst fixation, En: Unidad de Actividad Química, Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina .2007. p.1-21

Merck millipore. Ácido nítrico 69% | 101799. [Consultado el 15 noviembre 2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Nitric-acid-690-0,MDA_CHEM-101799#anchor_orderingcomp

Merck millipore. Ácido perclórico 60% | 100518. [0]. [Consultado el 15 de noviembre de 2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Perchloric-acid-600-0,MDA_CHEM-100518#anchor_orderingcomp

Merck millipore. Ácido perclórico 70-72% | 100519. [0]. [Consultado el 15 de Noviembre de2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Perchloric-acid-70-720-0,MDA_CHEM-100519

Merck millipore. Diclorometano CAS 75-09-2 | 106454. [0]. [Consultado el 15 de noviembre de2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/Dichloromethane,MDA_CHEM-106454

Merck millipore. Titanio(IV) cloruro CAS 7550-45-0 | 812382. [0]. [Consultado el 15 Noviembre de2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/TitaniumIV-chloride,MDA_CHEM-812382#anchor_orderingcomp

Merck. Cobre(II) sulfato
. [Consultado el 15 de Noviembre2018]. Disponible en: http://www.merckmillipore.com/CO/es/product/CopperII-sulfate,MDA_CHEM-102792

MORGAN Eric Richard. Solar water purification with PET bottles coated with titanium dioxide using improved binding agents, partial fulfillment of the requirements for the

degree of Master of Science energy engineering, solar, En: university of massachusetts lowell, USA 2008.p.19-90

MUNGKALASIRI, Jitti, et al. Antibacterial properties of TiO₂-Cu composite thin films grown by a one step DLICVD process. En: SURFACE AND COATINGS TECHNOLOGY. Aug 30,.vol. 242,

NADTOCHENKO, V.; RADTSIG, M. and KHMEL, I. Antimicrobial effect of metallic and semiconductor nanoparticles. En: NANOTECHNOLOGIES IN RUSSIA. Jun.vol. 5, no. 5, p. 277-289

NAKATA, Kazuya and FUJISHIMA, Akira. TiO₂ photocatalysis: Design and applications. En: JOURNAL OF PHOTOCHEMISTRY AND PHOTOBIOLOGY C: PHOTOCHEMISTRY REVIEWS. Jun.

NARVAEZ, Silvia; GOMEZ, Martha and ACOSTA, Jorge. Coliformes termotolerantes en aguas de las poblaciones costeras y palafíticas de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. En: ACTA BIOLÓGICA COLOMBIANA. vol. 13, no. 3, p. 113

NAVANEETHA K. Pandiyaraj, Effect of dc glow discharge plasma treatment on PET/TiO₂ thin film surfaces for enhancement of bioactivity. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces journal, Department of Physics, Bharathiar University, Coimbatore 2010 p.54.

NAVANEETHA K. Pandiyaraj, PERNI Stefano. Influence of operating parameters on surface properties of RF glow discharge oxygen plasma treated TiO₂/PET film for biomedical application. Department of Physics, Sri Shakthi Institute of Engineering and Technology, L&T by pass, Chinniyam Palayam (post), India 2013, pp 310.

NIETO E., et al., Películas delgadas: fabricación y aplicaciones, Instituto de Cerámica y Vidrio, En: boletín informativo, artículo de revisión. CSIC. Arganda del Rey. Madrid, España, 1994. p 255

Notas de clase; Polímeros, Universidad de América, 17 de agosto de 2018

NOWOTNY, Janusz and NOWOTNY, Maria K. Solid State Chemistry and Photocatalysis of Titanium Dioxide: Special Topic Volume with Invited Peer Reviewed Papers Only. Stafa-Zuerich: Trans Tech Publications, 2010.

Oxido de cobre (II). [Consultado el Apr 5,2018]. Disponible en: [https://www.ecured.cu/%C3%93xido_de_Cobre_\(II\)](https://www.ecured.cu/%C3%93xido_de_Cobre_(II))

PET un plástico amigable pero no inofensivo. En: PET UN PLÁSTICO AMIGABLE PERO NO INOFENSIVO. Revista Semana. Octubre 13.

POZAN, Gulin Selda; ISLEYEN, Meltem and GOKCEN, Sinem. Transition metal coated TiO₂ nanoparticles: Synthesis, characterization and their photocatalytic activity. En: APPLIED CATALYSIS B, ENVIRONMENTAL. Aug 1, vol. 140-141, p. 537

QUIROZ GAITÁN, Heiddy Paola. Preparación y estudio de las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas de nanotubos de TiO₂ para su aplicación en sensores ópticos. 2014.

SAITO, Toshihiko, et al. Effect of titania-based surface modification of polyethylene terephthalate on bone-implant bonding and peri-implant tissue reaction. En: ACTA BIOMATERIALIA. vol. 7, no. 4, p. 1558-1569

TWU M., et al., Properties of TiO₂ films deposited on flexible substrates using direct current magnetron sputtering and using high power impulse magnetron sputtering, Polymer Degradation and Stability journal, Department of Mechatronic Engineering, National Taiwan Normal University, Taiwan, 2015 pp 2.

Usos del dióxido de titanio | Información sobre la seguridad química. [1]. [Consultado el Apr 5,2018]. Disponible en: <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/dioxido-de-titanio/>

VINOTHKUMAR, N. and DE, Mahuya. Hydrogen production from water-methanol solution over visible light active indium-titanium oxide photocatalysts modified with copper oxide. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY. Jun.vol. 39, no. 22, p. 11494

Wilmer Y. Córdoba, et al. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y ELECTRÓNICAS DE LA FASE (P 4(2)/nm) DEL MnO₂. En: AVANCES EN CIENCIAS E INGENIERÍA. Jan 1, vol. 3, no. 4, p. 125-130


WORLD ECONOMIC FORUM. La economía del agua cada vez será más importante. [1]. [Consultado el Apr 5,2018]. Disponible en: <https://www.weforum.org/es/agenda/2017/03/la-economia-del-agua-cada-vez-sera-mas-importante/>

YANG Jae-Hun, et al., TiO₂ thin-films on polymer substrates and their photocatalytic activity. En: Thin Solid Films journal. Division of Nanoscience and Department of Chemistry, Ewha Womans University, Seoul, South Korea 2005. p 267.

ZANGENEH, H., et al. Photocatalytic oxidation of organic dyes and pollutants in wastewater using different modified titanium dioxides: A comparative review. En: JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY. Dec.

ANEXOS

ANEXO A
FICHA TÉCNICA DE DIÓXIDO DE TITANIO HOMBITAN AFDC



Product Information HOMBITAN AFDC

AFDC

HOMBITAN AFDC is an uncoated anatase titanium dioxide pigment with high whiteness and blue tone. From a chemical and microbiological point of view, it is exceptionally pure.

HOMBITAN AFDC is recommended for food-stuffs, pharmaceuticals as well as for cosmetic applications to provide opacity and brightness.

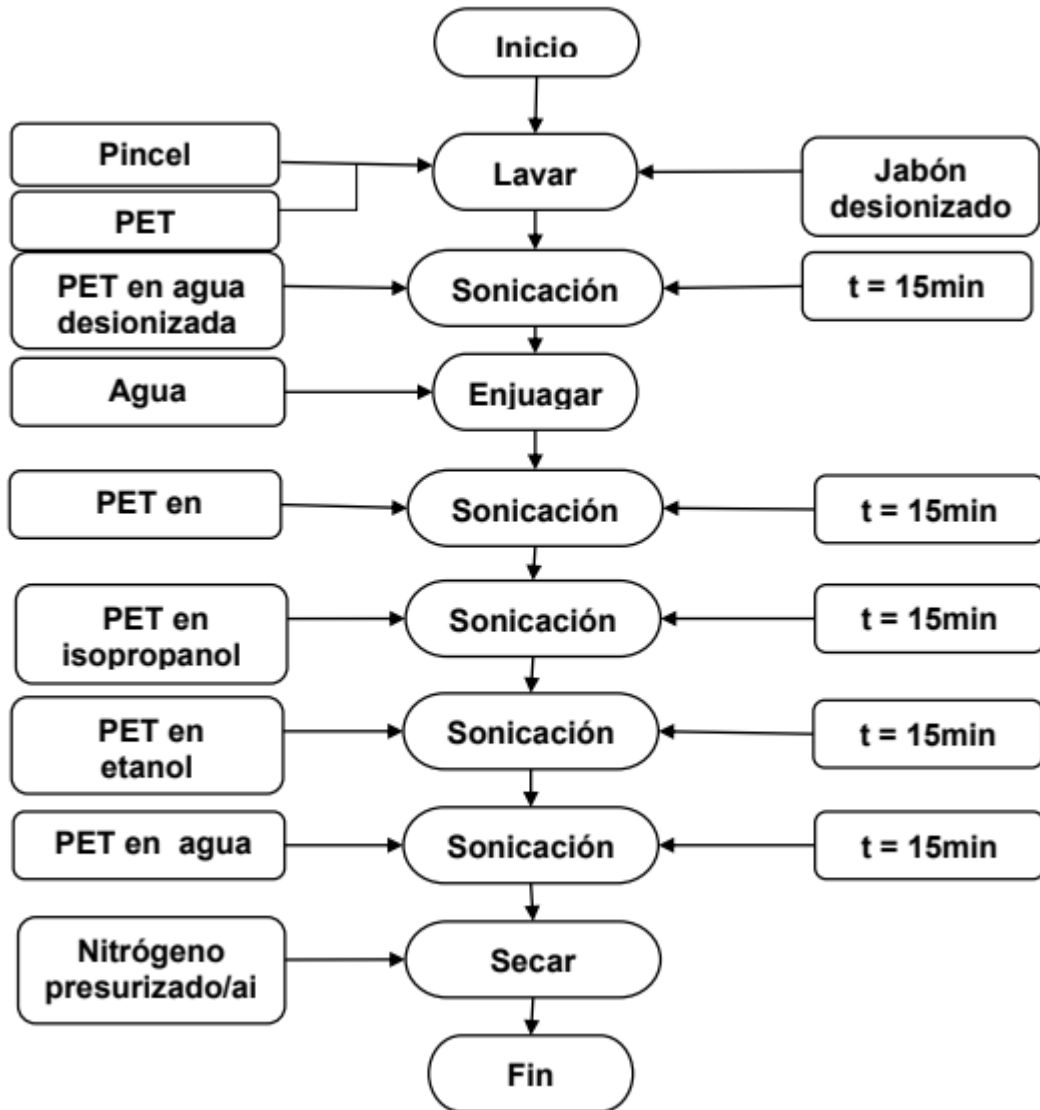
Cosmetics
Pharmaceuticals
Food

Typical Properties

▶ Appearance		white powder
▶ Oil absorption [g/100 g] pigment	approx.	19
▶ Specific surface area [m ² /g]	approx.	10
▶ Crystal size [nm]	approx.	170
Prior to surface treatment		
▶ Titanium dioxide [%]	min	99.0
▶ Moisture when packed [%]	max	0.5
▶ Loss on ignition [%]	max	0.5
▶ Water soluble substances [%]	max	0.25
▶ Acid soluble substances [%]	max	0.5
▶ pH		6-9
▶ Bulk density [g/m ³]	approx.	0.6

ANEXO B

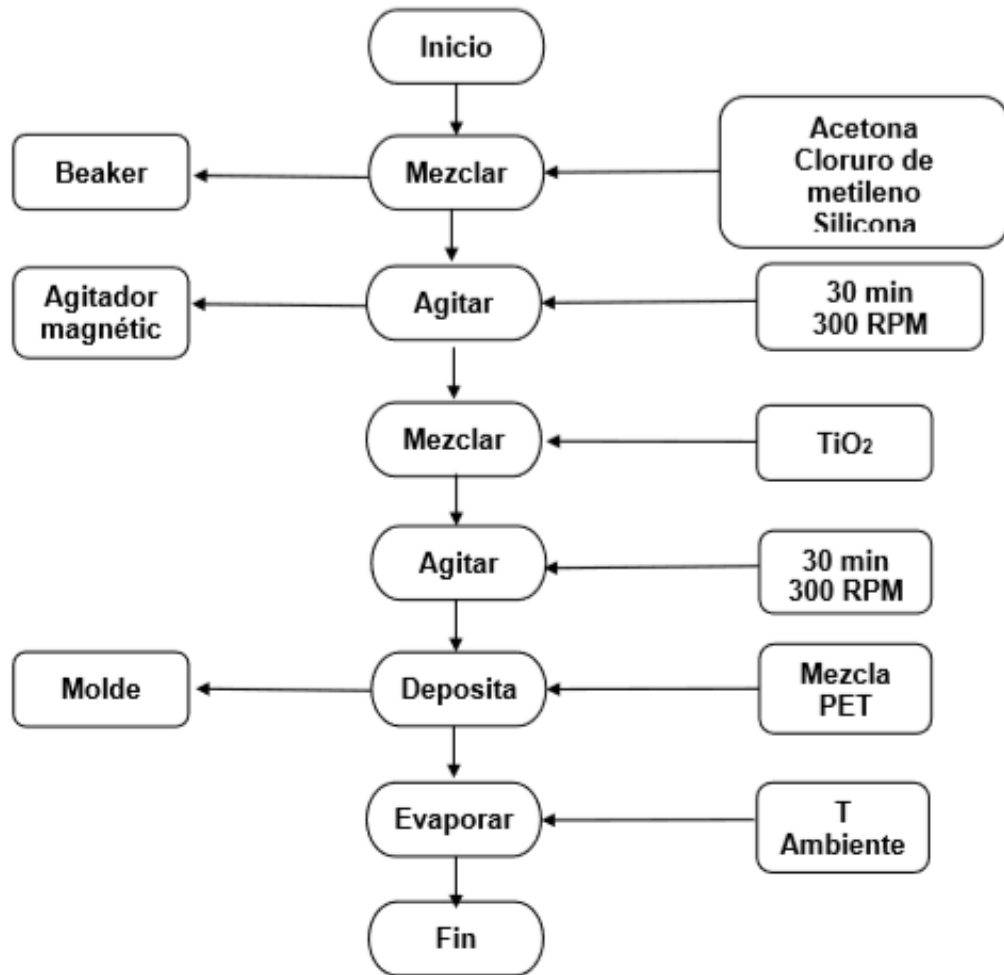
PROTOCOLO DE LAVADO PARA LAMINAS DE PET



Fuente: BARRERA TOCA Diana Carolina y MONROY LEYTON Cristian Andres. Evaluación Del Método De Fijación De TiO₂ Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de America, 2015. p. Anexo C

ANEXO C

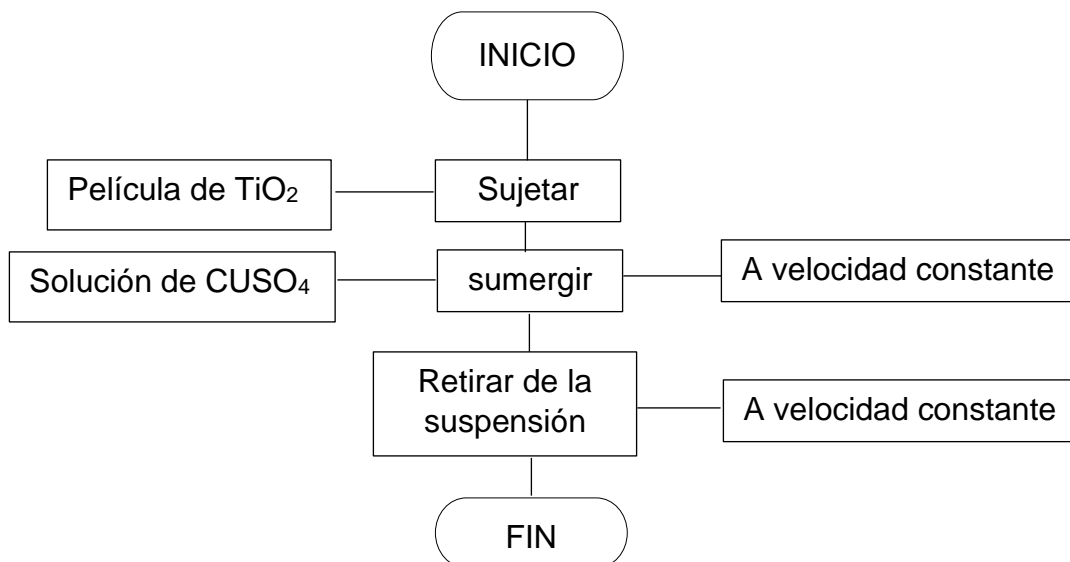
DIAGRAMA DE FLUJO PARA FIJACIÓN DE TiO_2 EN LÁMINAS PET



Fuente: BARRERA TOCA Diana Carolina y MONROY LEYTON Cristian Andres. Evaluación Del Método De Fijación De TiO_2 Sobre Polímero PET Para La Aplicación En Un Fotorreactor. Fundación Universidad de America, 2015. p. Anexo D

ANEXO D

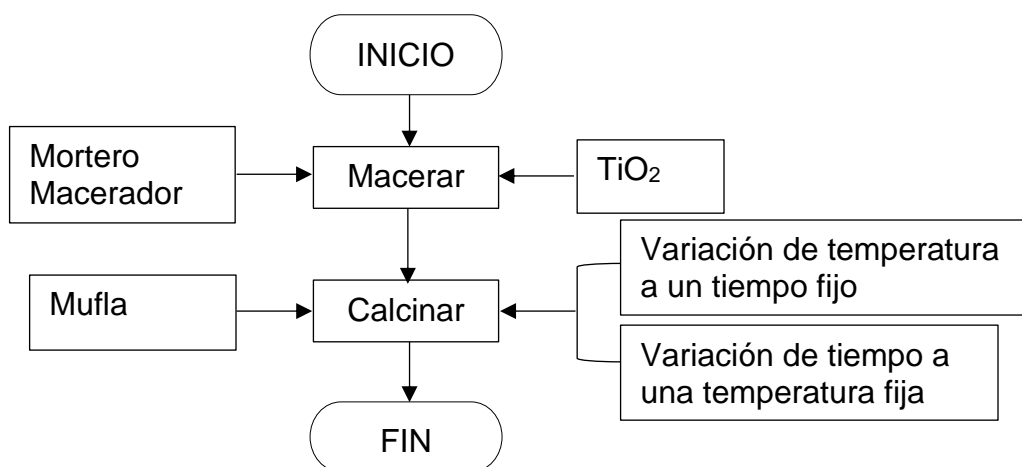
DIAGRAMA DE FLUJO PARA DEPOSICIÓN DE LA MODIFICACIÓN



Fuente: elaboración propia

ANEXO E

TRATAMIENTO TÉRMICO TiO_2



Fuente: elaboración propia

ANEXO F
ECUACIONES DE DEGRADACIÓN

Ecuación de concentración (ppm)

$$\text{Concentracion (ppm)} = \frac{\text{Abs actual} - b}{m}$$

Donde:

Abs actual: absorbancia actual

b: intercepto de la recta (curva de calibración de Azul de metileno)

m: Pendiente de la recta (curva de calibración de Azul de metileno)

Ecuación de porcentaje de remoción (degradación y absorción)

$$\% \text{ Degradacion} = \frac{C. anterior (ppm) - C. actual (ppm)}{C. anterior (ppm)}$$

Donde:

C. anterior: concentración anterior en ppm

C. actual: concentración actual en ppm