



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE NANOTUBOS DE Ti/TiO_2
SOBRE LA MOLÉCULA ÁCIDO ACETILSALICÍLICO (ASPIRINA)

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTAN:

EDUARDO AVALOS ZACARIAS

IVETTE GUADALUPE RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES

EN CODIRECCIÓN DE:

DRA. ERIKA VIVIANA MIRANDA MANDUJANO

CUNDUACÁN, TABASCO, A ENERO 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día 31 del mes enero del año 2025, el que suscribe **Eduardo Avalos Zacarias e Ivette Guadalupe Rodríguez Rodríguez** alumnos del Programa de Ingeniería Química con número de matrícula **192D22072 y 192D22182**, adscritos a la **División Académica de Ingeniería y Arquitectura**, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autores de la Tesis presentada para la obtención del título de **Ingeniero Químico** y titulada "**Capacidad de adsorción de nanotubos de Ti/TiO₂ sobre la molécula ácido acetilsalicílico (aspirina)**" dirigida por **Dr. Ildelfonso Zamudio Torres**.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente Villahermosa, Tabasco a 31 de enero 2025.


Eduardo Avalos Zacarias

Nombre y Firma


Ivette Guadalupe Rodríguez Rodríguez

Nombre y Firma

CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE NANOTUBOS DE Ti/TiO₂ SOBRE LA MOLÉCULA ÁCIDO ACETILSALICÍLICO (ASPIRINA)

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Internet	551 palabras — 4%
2	www.dbnl.org Internet	176 palabras — 1%
3	tesis.ipn.mx Internet	54 palabras — < 1%
4	www.researchgate.net Internet	51 palabras — < 1%
5	dof.gob.mx Internet	37 palabras — < 1%
6	doku.pub Internet	35 palabras — < 1%
7	riaa.uaem.mx Internet	35 palabras — < 1%
8	www.coursehero.com Internet	35 palabras — < 1%
9	repositorio.upch.edu.pe Internet	32 palabras — < 1%



COORDINACIÓN
DE ESTUDIOS
TERMINALES



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2025
Año de la
Mujer
Indígena

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/CD/0109/2024
FECHA: 24 de enero de 2025.
ASUNTO: Autorización de Impresión definitiva.

C. IVETTE GUADALUPE RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ
C. EDUARDO AVALOS ZACARIAS
PASANTES DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por el DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES y por la DRA. ERIKA VIVIANA MIRANDA MANDUJANO, titulado:

"CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE NANOTUBOS DE Ti/TiO₂ SOBRE LA MOLÉCULA ÁCIDO ACETILSALICÍLICO (ASPIRINA)"

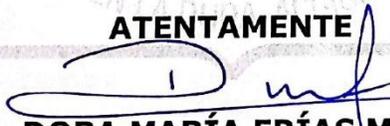
Tengo a bien autorizarles la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, les informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".

Sin otro particular por el momento, me despido deseándoles éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE


DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA QUÍMICA-338
DRA'DMFM/M.C.'LHC

Miembro CUMEX desde 2008
Consortio de
Universidades
Mexicanas
UNA ALTA DE CALIDAD EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx



DIRECCIÓN

MEMORANDO

PARA: DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA DE LA DAIA.
DE: COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL
FECHA: 20 DE ENERO DE 2025
ASUNTO: ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL
CCP: ARCHIVO.
MEM/CET/338/ID338/2025

PRESENTE.

En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 112 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

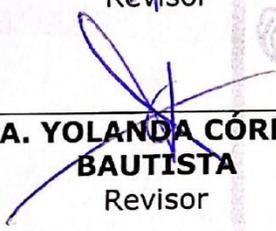
"CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE NANOTUBOS DE Ti/TiO₂ SOBRE LA MOLÉCULA ÁCIDO ACETILSALICÍLICO (ASPIRINA)"

Desarrollado por los C. IVETTE GUADALUPE RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ y EDUARDO AVALOS ZACARIAS de la Licenciatura en INGENIERÍA QUÍMICA bajo la modalidad de "Tesis", le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA


DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
Revisor

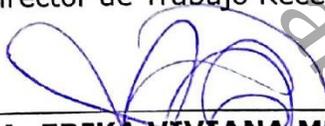

DRA. MARÍA DE LOS ÁNGELES OLÁN ACOSTA
Revisor


DRA. YOLANDA CÓRDOVA BAUTISTA
Revisor


DRA. MA. GUADALUPE RIVERA RUEDAS
Revisor


DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ RIVERA
Revisor


DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES
Director de Trabajo Recepcional


DRA. ERIKA VIVIANA MIRANDA MANDÚJANO
Co-Director de Trabajo Recepcional

Carta de Cesión de Derechos

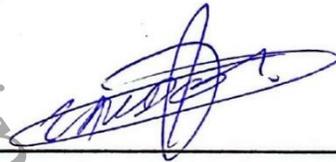
Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTORES en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "**Capacidad de adsorción de nanotubos de Ti/TiO₂ sobre la molécula ácido acetilsalicílico (aspirina)**".

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



Eduardo Avalos Zacarias



Dr. Idefonso Zamudio Torres



Ivette Guadalupe Rodríguez Rodríguez



Dra. Erika viviana Miranda Mandujano

TESTIGOS


Duce Cristina Rodríguez R.


Adriana del Carmen Castellanos T.



DEDICATORIA

La presente tesis, la dedico principalmente a Dios, quien me ha llenado de bendiciones a lo largo de estos años, otorgándome sabiduría, fortaleza, conocimiento, salud y sobre todo la oportunidad de poder terminar este nuevo capítulo de mi vida.

Dedico este trabajo a mi familia, quienes fueron parte de este proceso, que en cada debilidad y tropiezo, mostraron su amor incondicional, impulsándome a seguir adelante, brindándome palabras de aliento. Su apoyo y compañía en cada noche de desvelo, me enseñaron a que cada sacrificio durante estos cinco años fueron fundamentales para la culminación de este proyecto.

De igual forma a todos los amigos que compartieron parte de esta aventura conmigo, les dedico esta tesis, por mostrar su solidaridad y concederme su compañía, los momentos de experimentación donde estuvieron hicieron que la realización de este trabajo fuera una experiencia única e inolvidable.

Eduardo Avalos Zacarias



DEDICATORIA

Con profunda gratitud, dedico este trabajo a Dios, mi fuente de fortaleza y guía en cada paso de mi vida. Sus bendiciones me han permitido enfrentar los desafíos con valentía y perseverancia a lo largo de estos dos años de aprendizajes.

A mis padres, pilares fundamentales en mi vida, les agradezco por su amor incondicional y su dedicación. A mi madre, ejemplo de esfuerzo y bondad, por su apoyo constante, sus cuidados y sus palabras de aliento, que siempre me llenaron de esperanza. A mi padre, por su guía y motivación inquebrantables, que me han inspirado a construir un futuro mejor.

A mis hermanos, quienes han estado presentes en los momentos difíciles, brindándome su apoyo y unión, especialmente a mi hermana, cuya compañía en largas noches de trabajo compartidas fue un alivio invaluable.

Extiendo también esta dedicatoria a mis amigos, por confiar en mí y estar siempre a mi lado, y a mis asesores, cuya orientación y confianza fueron clave para alcanzar este logro.

Finalmente, agradezco a la vida por la compañía incondicional de mi mascota, quien, en las largas madrugadas, me brindó consuelo y motivación para seguir adelante. Este logro es para todos ustedes, y, sobre todo, para Dios, quien guía mi camino y me da la sabiduría para enfrentar cada reto.

Ivette Guadalupe Rodríguez Rodríguez



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento al Dr. Ildefonso Zamudio Torres, director de esta tesis, por el tiempo, paciencia y constante motivación, hicieron posible que cada paso que dimos para la conclusión de este proceso de investigación, fuera una grata experiencia llena de sabiduría y muchos éxitos durante el camino.

A la Dra. Erika Miranda Mandujano, mi gratitud por sus valiosos comentarios y su apoyo, especialmente en el análisis de toxicidad, brindando observaciones que permitieron mejorar diversos aspectos del proyecto.

A mi madre, Adriana del Carmen Zacarias Cerino, y a mi padre, Ángel Avalos Arias, quienes desde el inicio de la carrera me impulsaron a continuar día con día, agradezco su esfuerzo y sacrificio durante todos estos años, que sin importar las dificultades mostraron su amor absoluto, buscando en cada momento mi bienestar.

A mi abuela, Martha del Carmen Cerino, le agradezco profundamente por su amor, apoyo y sabiduría que ha sido fundamentales en mi crecimiento fundamental en mi crecimiento personal y académico. A mi Bisabuela Margarita Jiménez quien fue una mujer excepcional que influyó en mi vida de manera profunda, su legado vivirá en mi siempre.

A la UJAT, por proporcionarme los conocimientos y la formación ética necesarios para llevar a cabo esta investigación. De igual manera, agradezco a los revisores de esta tesis, la Dra. Ma. Guadalupe Rivera Rueda, el Dr. Erick Ramírez Morales, la Dra. María de los Ángeles Olán Acosta, la Dra. Yolanda Córdoba Bautista y el Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera, por su dedicación y valiosas sugerencias que contribuyeron a enriquecer este trabajo.

Un agradecimiento especial a Ingrit Domínguez, quien, con su apoyo y compañía, me dieron fuerza y motivación en cada momento de estrés. A mis amigos, en especial a Alex Cortázar, y a mi compañera de tesis, gracias por convertirse en mis compañeros en esta aventura.

Eduardo Avalos Zacarías



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. Ildelfonso Zamudio, director de esta tesis, por su invaluable guía y constante motivación, las cuales fueron esenciales para la culminación de este proyecto, su compromiso, sus valiosos consejos fueron pilares fundamentales en este proceso, por lo que le estaré siempre agradecida.

A la Dra. Erika Miranda Mandujano, le extiendo mi más sincera gratitud por su incondicional apoyo y el tiempo dedicado a la interpretación de los análisis de toxicidad. Su orientación y confianza han sido de gran importancia en el desarrollo de este trabajo.

A mi alma máter, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, le agradezco por brindarme los conocimientos, valores y la formación ética que me han permitido llevar a cabo esta investigación. Asimismo, agradezco a los revisores de esta tesis, la Dra. Ma. Guadalupe Rivera Rueda, el Dr. Erick Ramírez Morales, la Dra. María de los Ángeles Olán Acosta, la Dra. Yolanda Córdoba Bautista y el Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera, por su dedicación, paciencia y valiosas observaciones, las cuales contribuyeron significativamente a la mejora de este trabajo.

A mi madre, Gladis Rodríguez Candelero, y a mi padre, José Rodríguez de la Cruz, les agradezco por su apoyo incondicional y por enseñarme a valorar el esfuerzo y la perseverancia como pilares fundamentales en la vida. A mis hermanos, Dulce Cristina Rodríguez y Eduardo Rodríguez, quienes con su cariño y ejemplo constante han sido una fuente de inspiración invaluable. Estoy profundamente agradecida con Dios por darme dos hermanos tan dedicados y admirables. A mi fiel compañero, mi mascota Balto, por acompañarme en las largas noches de trabajo.

Un agradecimiento especial a Ángel Treviño por su apoyo inquebrantable durante este proceso, por estar siempre a mi lado y ofrecerme ánimo en cada paso del camino. A mis amigos en especial Alex Bolaina y a mi compañero de tesis, gracias por compartir conmigo tantos momentos memorables hicieron de estos años una experiencia inolvidable.

Ivette Guadalupe Rodríguez Rodríguez



ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	13
<i>Palabras clave:</i>	13
Abstract.....	14
<i>Keywords:</i>	14
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Introducción.....	16
1.2 Marco Teórico.....	18
1.2.1 Adsorción.....	18
1.2.2 Propiedades de los adsorbentes.....	19
1.2.3 Dióxido de Titanio como Adsorbente.....	21
1.2.4 Nanotubos de TiO_2 por anodizado.....	22
1.2.5 Tratamiento Térmico.....	23
1.2.6 Post tratamiento a la fase metaestable.....	24
1.2.7 Contaminantes emergentes.....	25
1.2.8 Aspirina como contaminante emergente.....	27
1.2.9 Toxicidad aguda y <i>Vibrio Fischeri</i>	29
1.2.10 Pruebas de toxicidad.....	30
1.3 Justificación.....	34
1.4 Preguntas de Investigación.....	35
1.5 Hipótesis.....	36
1.6 Objetivo general.....	36
1.7 Objetivos específicos.....	36
CAPÍTULO II METODOLOGÍA.....	37



2.1 Metodología obtención de nanotubos TiO_2 por proceso de anodizado electroquímico.....	38
2.1.2 Elaboración de solución orgánica	38
2.1.3 Anodizado	39
2.1.4 Cátodo	39
2.1.5 Montaje del experimento.....	40
2.1.6 Resumen obtención de nanotubos TiO_2	43
2.2 Metodología de la adsorción de la molécula	45
2.2.1 Muestra	45
2.2.2 Cámara de adsorción.....	46
2.2.3 Resumen adsorción de la molécula de Ácido acetilsalicílico (aspirina)	48
2.3.1 Resumen perfilometría de las placas	52
2.4 Análisis de adsorción de luz UV-Vis.....	53
2.4.1 Elaboración de curva de calibración	53
2.4.2. Resumen Procedimiento Análisis de adsorción de luz UV-Vis.....	57
2.5 Metodología toxicidad aguda	58
2.5.1 Resumen Procedimiento Análisis de absorción de luz UV-Vis.....	63
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	65
3.1 Anodizado de placas de titanio.....	66
3.2 Perfilometría	67
3.3 Cuantificación por UV-Vis.....	69
3.4 Prueba de toxicidad Vibrio-Fischeri.....	75
CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
Referencias bibliográficas	83
ANEXOS	90



Anexo 1.....	90
Anexo 2.....	90
Anexo 3.....	91
Anexo 4.....	92
Anexo 5.....	92
Anexo 6.....	94
Anexo 7.....	95
Anexo 8.....	96
Anexo 9.....	97

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales adsorbente utilizados.....	19
Tabla 2 Resumen de las propiedades físicas del TiO_2	22
Tabla 3 Tipos y fuentes de contaminantes emergentes (fármacos).....	26
Tabla 4 Principales propiedades fisicoquímicas del AAS.....	29
Tabla 5 Ensayos biológicos con diferentes organismos.....	31
Tabla 6 Voltaje vs tiempo para el anodizado de las placas.....	41
Tabla 7 Valores de rugosidad de las muestras anodizadas.....	68
Tabla 8 Porcentajes de degradación de aspirinas de las placas anodizadas.....	70
Tabla 9 Muestras de 20 ppm (A), 10 mg de TiO_2 y (B) placa de 4 horas (C).....	76
Tabla 10 Resultados de toxicidad aguda obtenidos por la prueba Vibrio Fischeri.....	77
Tabla 11 Datos para la elaboración de la curva de calibración.....	91



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación esquemática del proceso de adsorción.	18
Figura 2 Fuentes de fármacos antiinflamatorios no esteroides en el medio acuático. .	28
Figura 3 Diagrama de pruebas de toxicidad de acuerdo con el (IMTA).	34
Figura 4 Solución orgánica.	38
Figura 5 Placa de Ti (ánodo).	39
Figura 6 Placa de Ti (cátodo).	39
Figura 7 A) Laminas de Ti (ánodo) con residuos y B) sonicado de cátodo en el equipo.	40
Figura 8 Método experimental de para obtención de TiO_2	41
Figura 9 Esquema de la celda electroquímica.	42
Figura 10 Tratamiento post metaestable de 96 h.	43
Figura 11 Diagrama de método experimental obtención de nanotubos de TiO_2	44
Figura 12 Placas con el recubrimiento de TiO_2 en diferentes tiempos (2h, 4h, 6h y 8h).	45
Figura 13 Tabletas de aspirina caducada en Jul / 23.	45
Figura 14 Cámara de adsorción a) vista lateral y b) vista frontal.	46
Figura 15 a) Pesaje de muestra de aspirina y b) disolución de la muestra.	46
Figura 16 Solución de 20 ppm de aspirina.	47
Figura 17 A) Adsorción de la molécula de ácido acetilsalicílico vista frontal y B) vista superficial.	47
Figura 18 Diagrama de adsorción de la molécula de ácido acetilsalicílico.	48
Figura 19 A) Perfilómetro óptico D-500-KLA-TENCOR y B) mesa del perfilómetro D- 500.	49
Figura 20 A) Placa de titanio analizada por el perfilómetro. B) programa de perfilómetro óptico.	50
Figura 21 Representación de preparación del análisis de superficie de la placa de titanio.	50
Figura 22 Manejo del posicionamiento para el análisis de distinto puntos de la superficie.	51
Figura 23 Diagrama de metodología de perfilometría de las placas.	52



Figura 24 Solución madre para la curva de calibración.....	53
Figura 25 El instrumento está preparado para medir.	54
Figura 26 Vista lateral del espectrofotómetro.	54
Figura 27 A) Muestra agregada en la celda de cuarzo y B) condiciones de operación.....	55
Figura 28 Análisis de absorción UV-Vis.....	55
Figura 29 Muestras analizadas por el UV-Vis.....	56
Figura 30 Diagrama de metodología de análisis UV-Vis.	57
Figura 31 A) Equipo para medir toxicidad aguada Microbics M 500 y B) vista frontal. .	58
Figura 32 Inicio de la prueba de toxicidad (agregando 1250 μ L de la solución reconstituyente).....	58
Figura 33 Esquema de la solución diluyente en los pozos A ₁ a A ₄ , y 500 μ L en los pozos B ₁ a B ₅	59
Figura 34 A) Bacteria bioluminiscente Vibrio Fischeri, B) se agrega solución reconstituyente y C) se deposita la bacteria en el pozo de reactivo.....	60
Figura 35 A) Muestra de 20 ppm y B) mezcla homogénea preparada con la solución osmótica.....	60
Figura 36 Esquema representativo para extraer 1000 μ l del pozo A ₅ y depositarlos en el pozo A ₄	61
Figura 37 A) Se agrega 10 μ L de reactivo microbiano a cada pozo B y B) equipo vortex maxiMix II de thermo scientific, modelo M37615.....	62
Figura 38 Representación de los botones de lectura del equipo Microbics M 500 Toxicity Analyzer.	62
Figura 39 Esquema representativo para la lectura 2 que indica la adición de 500 μ L de A ₁ a B ₁ , donde la bacteria está en contacto con la muestra.....	63
Figura 40 Diagrama de metodología de toxicidad.	64
Figura 41 Placas de Ti anodizadas a diferentes tiempos, 2h, 4h, 6h y 8h.....	66
Figura 42 A) Placas de titanio en su estado inicial y B) después del proceso de anodizado.....	66
Figura 43 Superficie de la placa anodizada de titanio en diferentes tiempos A) 2h, B) 4h, C) 6h y D) 8h a una escala de 500 μ m.....	67
Figura 44 Perfil de las superficies de Ti anodizado a A) 2h, B) 4h, C) 6h y D) 8h.	68



Figura 45 Espectro de absorción de UV-Vis en una muestra de aspirina a 20 ppm.....	69
Figura 46 Gráfica de porcentajes de adsorción de aspirina utilizando placas anodizadas en periodos de 2, 4, 6 y 8 h.....	71
Figura 47 Espectro de absorción UV-Vis para una sola muestra de titanio anodizado de 4h en tres diferentes soluciones de aspirina a 20 ppm.	72
Figura 48 Espectro de absorción de dióxido de titanio (TiO_2) comercial en soluciones a 20 ppm de aspirina.....	73
Figura 49 Equipo de análisis toxicológico Microbics M500.....	75
Figura 50 Muestras para el análisis Vibrio Fischeri (20 ppm, 10 mg y P-4H).	76
Figura 51 Representación esquemática del orden de las muestras en los pozos dispuestos en 6 filas y 5 columna.....	91

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE NANOTUBOS DE Ti/TiO_2 SOBRE LA MOLÉCULA ÁCIDO ACETILSALICÍLICO (ASPIRINA)

Resumen

Actualmente, se consideran contaminantes emergentes a un grupo de sustancias presentes en concentraciones diminutas, pero con un gran impacto ambiental debido a sus características tóxicas. Estos contaminantes provienen de diversas fuentes, principalmente de descargas de aguas residuales de instalaciones médicas, áreas urbanas e industriales. La eliminación inadecuada de medicamentos en desagües o inodoros contribuye significativamente a este problema, intensificado por la falta de conciencia pública sobre la correcta gestión de productos farmacéuticos en especial la aspirina.

Diferentes estudios han demostrado que la adsorción es una alternativa eficaz para eliminarlas. Adsorbentes con alta porosidad y gran área superficial, como los nanotubos de TiO_2 , son especialmente eficientes. La formación de estos nanotubos, utilizando HF y variando voltajes, mejora el crecimiento por oxidación. Durante el anodizado de titanio, se obtienen nanotubos de NH_4TiOF_3 , esta fase es metaestable, por lo que, mediante un procedimiento de oxidación e hidrólisis, evolucionan a TiO_2 , eliminando el flúor y estabilizando la estructura.

Los sistemas de tratamiento convencionales pueden no ser eficaces para eliminar la aspirina, lo que aumenta el riesgo de exposición crónica para la biodiversidad acuática y la salud humana. Este estudio busca proponer una alternativa viable para reducir la presencia de este contaminante emergente a través de un material con alta capacidad de adsorción y por consecuencia, disminuir la toxicidad del agua contaminada por la aspirina.

Palabras clave: Contaminantes emergentes, nanotubos TiO_2 , ácido acetilsalicílico y toxicidad.



Abstract

Currently, emerging pollutants are considered to be a group of substances present in minute concentrations, but with a harmful environmental impact due to their toxic characteristics. These pollutants come from various sources, mainly from wastewater discharges from medical facilities, as well as from urban and industrial areas. The inappropriate disposal of medicines in drains or toilets contributes significantly to this problem, which is intensified by the lack of public awareness about the correct management of pharmaceutical products, especially aspirin.

Different studies have shown that adsorption is an effective alternative to eliminate them. Adsorbents with high porosity and large surface area, such as TiO_2 nanotubes, are especially efficient, the formation of these nanotubes, using HF and varying voltages, improves growth by oxidation. During titanium anodizing, NH_4TiOF_3 nanotubes are obtained, this phase is metastable, so, through an oxidation and hydrolysis procedure, they evolve to TiO_2 , eliminating fluorine and stabilizing the structure.

Conventional treatment systems may not be effective in removing aspirin, increasing the risk of chronic exposure for both aquatic biodiversity and human health. This study seeks to propose a viable alternative to reduce the presence of this emerging contaminant through a material with high adsorption capacity and, consequently, to reduce the toxicity of water contaminated by aspirin.

Keywords: *Emerging contaminants, TiO_2 nanotubes, acetylsalicylic acid and toxicity.*



CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN





1.1 Introducción

Las nanopartículas han despertado un considerable interés en diversas industrias, que abarcan campos como la farmacéutica, la cosmética y pigmentación de pinturas. Dentro de este panorama, nos centramos específicamente en las nanoestructuras de TiO_2 , las cuales ejercen un impacto tecnológico significativo gracias a sus propiedades notables, como alta transmitancia, biocompatibilidad y notable estabilidad química (David et al., 2022).

El método propuesto para obtener nanotubos de TiO_2 que se describe en este documento se considera una técnica sencilla y sostenible, ya que sugiere el anodizado del titanio en forma de placa para generar superficies de TiO_2 donde se pueden formar los nanotubos.

Balamurugan et al. (2022) resalta que el TiO_2 exhibe tres formas polimórficas principales en la naturaleza: anatasa, rutilo y brookita. Entre estas, las fases anatasa y rutilo destacan por su alto índice de refracción y sus sobresalientes propiedades fotocatalíticas. Las transiciones estructurales entre ambas han captado especial atención por sus aplicaciones, siendo uno de los métodos para obtenerlas el anodizado electroquímico, seguido de tratamientos posterior.

Otros autores describen que, durante este proceso, el ánodo experimenta oxidación, dando lugar a la formación de una capa protectora (Albertin et al., 2023; Ivanovskaya et al., 2022). Se genera una capa decorativa con mayor espesor y densidad de óxido sobre la superficie metálica. Después de completar la anodización electroquímica del titanio a TiO_2 , el tratamiento subsiguiente comúnmente implica la eliminación de residuos superficiales presentes, por lo que en este trabajo realizamos un tratamiento metaestable en el sustrato anodizado.

Algunos autores como Parolini (2020), destacan que la aspirina es uno de los analgésicos más prescritos en la atención médica a nivel mundial durante más de 90 años. Aunque las concentraciones de este compuesto en aguas superficiales son bajas, su actividad biológica significativa podría generar efectos tóxicos en organismos acuáticos no objetivo.



Sin embargo, el proceso de adsorción enfrenta desafíos importantes, como la toxicidad residual de los adsorbentes utilizados, la necesidad de emplear productos químicos en el proceso de desorción y el riesgo de transferir contaminantes a otros medios es lo que exige estrategias más sostenibles para mitigar su impacto ambiental.

La toxicidad aguda, regulada bajo la norma NMX-AA-112-SCFI-2017, es fundamental para evaluar el impacto inmediato que diversas sustancias químicas tienen sobre los organismos vivos. En este ámbito, la bacteria luminiscente *Vibrio fischeri* se destaca como un indicador biológico muy eficaz para determinar la toxicidad de una amplia variedad de compuestos. El principio de esta técnica, según lo descrito por Su et al. (2023), indica que esta bacteria, que emite luz como resultado de su metabolismo, reduce su luminiscencia cuando está en contacto con sustancias tóxicas, lo que permite realizar una medición rápida y precisa gracias a su alta sensibilidad, este método ha sido aprobado por la Organización Internacional de Normalización (ISO 11348–1:2007).

El uso de *Vibrio fischeri* en este estudio es particularmente valioso por su sensibilidad y rápida respuesta al contaminante específico, en este caso, la aspirina, lo que la convierte en una herramienta clave para evaluar la eficacia de los nanotubos de TiO_2 como adsorbente. Este enfoque no solo proporciona información crucial sobre la toxicidad inmediata, sino que también facilita la identificación temprana de riesgos potenciales para la salud.

En este trabajo se propone una alternativa para la reducción de la presencia de la molécula de aspirina (ácido acetilsalicílico) en cuerpos de agua, por medio de adsorción, empleando placas anodizadas de TiO_2 , obtenidas por anodizado de titanio en un medio orgánico y reducir la toxicidad aguda provocada por este medicamento.

1.2 Marco Teórico

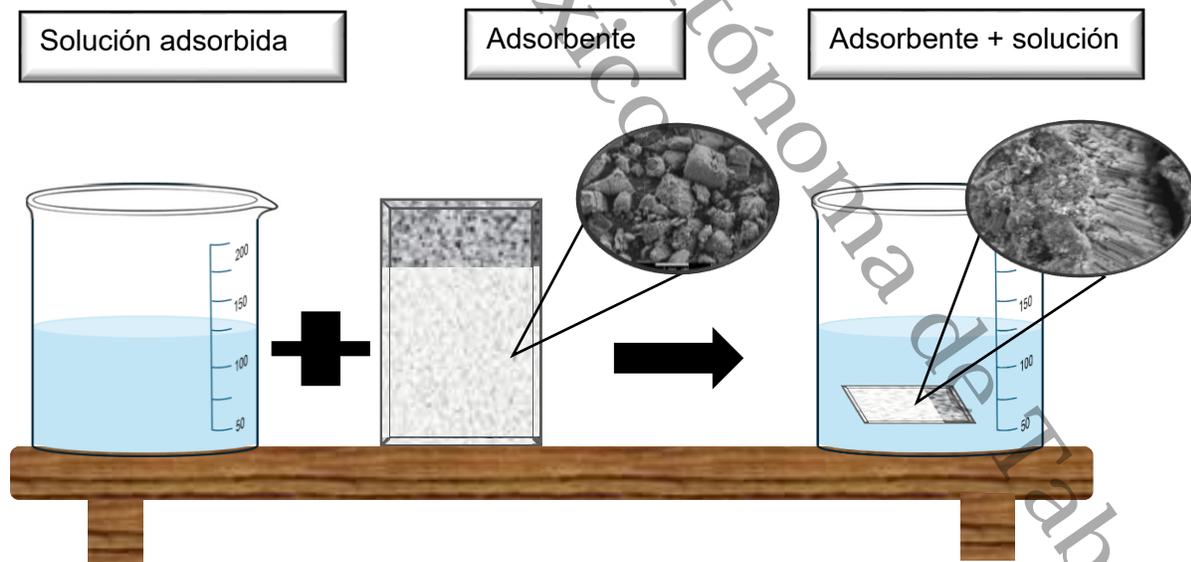
1.2.1 Adsorción

El término de adsorción es un proceso que ha sido tomado como un tema de interés para la comunidad científica en los últimos años. La literatura menciona las diversas utilidades de los adsorbentes en los procesos para purificar el aire y tratamiento de aguas residuales, recuperación y detección de compuestos químicos, además su aplicación para la disminución de humedad, así como la conversión de la energía solar, entre otros (Pellenz et al., 2023).

Esto es consecuencia de la fuerza de transferencia de masa surgida de la diferencia de concentración entre un fluido y sólido, en términos más simples, podemos referirnos a la adsorción como un proceso de interacción de las partículas involucradas (moléculas, iones, átomos), las cuales son adheridas o atrapados sobre una superficie de un material con propiedades adsorbentes (Figura 1).

Figura 1

Representación esquemática del proceso de adsorción.





1.2.2 Propiedades de los adsorbentes

Se ha demostrado que en las aguas están contenidas diversos tipos de sustancias, que a pesar de que algunas de estas se encuentran en concentraciones de trazas, pueden causar un gran problema para la salud, es por esta razón el proceso de adsorción se ve como una alternativa atractiva para la eliminación de estos contaminantes.

He et al. (2023) especifica que algunos de los aspectos de claves de los adsorbedores son su alta porosidad, así como también un área superficial considerable, ya que son factores determinantes para la fijación de las partículas en el sólido.

Como se dijo anteriormente, los poros de los materiales adsorbentes son características determinantes para el proceso de adsorción, debido a que se requiere un volumen y una distribución de poros considerando la partícula que se quiere tratar, como su tamaño, densidad, peso, etc. Sin embargo, estos no son los únicos factores que pueden interferir en la adsorción, puesto que las condiciones de temperatura, humedad e incluso el pH pueden influir en gran medida a este proceso (X. Li et al., 2020).

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los principales adsorbentes utilizados y sus características fisicoquímicas.

Tabla 1

Principales adsorbente utilizados.

Adsorbentes	Características
Nanoestructuras de óxido de hierro	Debido a sus propiedades superparamagnéticas, poseen buena versatilidad, además de un bajo costo económico e impacto mínimo para el ambiente (Chacón et al., 2020).
Nanomateriales de carbono (Grafeno)	Partículas de dimensiones pequeñas, además de poseer una gran capacidad de adsorción. No obstante, a pesar de sus propiedades únicas, las láminas de



	<p>grafeno a nivel nano presentan dificultad para apilarlas entre sí, y esta interacción impiden un desarrollo de transferencia de masa, limitando el rendimiento del proceso (Kong et al., 2021).</p>
Hidrogeles	<p>Materiales poliméricos de estructuras tridimensionales. Se caracterizan por la retención y absorción de agua. De acuerdo con su composición, pueden ser en hidrogeles poliméricos naturales o de macromolécula sintética (Mu et al., 2020).</p>
Zeolitas	<p>Poseen propiedades únicas de adsorción, además se capacidad de intercambiar iones, eso sin mencionar sus aplicaciones como filtro y características catalíticas, de fácil obtención y costo mínimo (Gaikwad et al., 2024).</p>
Carbón Activado	<p>Empleado como adsorbente por su gran versatilidad y eficacia, además de una fácil obtención de materiales de bajo costo, posee una estructura cristalina y una superficie extremadamente porosa (Islam et al., 2024).</p>



1.2.3 Dióxido de Titanio como Adsorbente

De acuerdo con Zong et al. (2023), el dióxido de titanio (TiO_2) ha recibido considerable interés en las últimas cuatro décadas debido a su no toxicidad, estabilidad, accesibilidad, bajo costo y su eficacia en la purificación del aire y el agua. Las aplicaciones prácticas del TiO_2 como fotocatalizador en soluciones acuosas están restringidas por desafíos en la recuperación del catalizador, especialmente debido a las partículas finas del mismo.

No obstante, este inconveniente puede resolverse al adherir el TiO_2 a soportes adecuados, lo que elimina la necesidad de emplear técnicas costosas y complicadas para su recuperación. Esto también asegura un mejor contacto entre el semiconductor y los contaminantes orgánicos, al mismo tiempo que reduce el nivel de contaminantes en el agua a tratar, de acuerdo con Scrimieri et al. (2020) una parte significativa de estos disminuye la disponibilidad de agua potable. Por lo tanto, es crucial encontrar soluciones a esta problemática, como la adsorción o la degradación a través de la fotocatálisis de estos compuestos.

Por lo anterior, el TiO_2 emerge como un candidato prometedor en la adsorción de contaminantes, dado que las nanopartículas presentan una notable capacidad de adsorción en el metileno y diclofenaco como contaminantes modelo en las pruebas de adsorción. La estructura porosa y su extensa área superficial, permitió la eficiente adsorción de grandes cantidades de la solución acuosa.

Además, se demostró que los polvos de TiO_2 obtenidos resultan apropiados para aplicaciones destinadas a la adsorción y recuperación de compuestos dañinos. Además, el TiO_2 es reconocido por sus propiedades mecánicas y ópticas, aplicables en diversos campos como la ciencia energética, ambiental, antibacteriana y de materiales.

Es relevante mencionar que el TiO_2 posee una estructura cristalina compacta y se presenta en tres fases: anatasa, rutilo y brookita. Puede sintetizarse mediante diversas técnicas químicas y físicas en forma de nanopartículas y películas delgadas. A temperaturas de calcinación bajas ($TC < 400\text{ }^\circ\text{C}$), muestra una estructura amorfa y porosa.



Se ha observado que el equilibrio de adsorción se alcanza en aproximadamente 30 minutos durante las pruebas. En la Tabla 2 se presentan las propiedades físicas del TiO_2 (Ayorinde & Sayes, 2023).

Tabla 2

Resumen de las propiedades físicas del TiO_2 .

Parámetro físico	Característica
Estados de oxidación del titanio	+ 4, + 3, + 2
Formas cristalográficas	Rutilo, anatasa y brookita
Solubilidad en agua	Insoluble
Número CAS	13463-67-7
Densidad relativa	4.23 g / cm ³
Forma física	Polvo sólido blanco
Peso molecular	79.866 g/mol
Banda prohibida	3.0–3.2 eV

Nota: Adaptado de “Una revisión actualizada del dióxido de titanio de relevancia industrial y sus efectos sobre la salud ambiental”, por (Ayorinde & Sayes, 2023).

1.2.4 Nanotubos de TiO_2 por anodizado

Existen diversas publicaciones que discuten la formación de nanotubos de TiO_2 , por ejemplo, Sivaprakash & Narayanan (2021), utilizan un medio ácido de HF, el cual es un componente crucial en la fabricación de dichos nanotubos. El estudio reveló la formación de diversos tipos de nanotubos con variadas concentraciones de iones F. A pesar de ello, se describe que el incremento en el crecimiento de los nanotubos se debe al contenido de H_2O , debido al crecimiento a través de la oxidación, que reacciona principalmente con el contenido de oxígeno, lo que sugiere que, en diferentes niveles de contenido de agua, se logra el aumento en el crecimiento de los nanotubos.

Es importante mencionar que el voltaje de entrada juega un papel fundamental en la síntesis de los nanotubos de TiO_2 . Se ha notado que la modificación de los voltajes,



incluyendo los voltajes de rampa, favorece el proceso de crecimiento por oxidación, además, varios autores discuten diversas técnicas para comprender el mecanismo de crecimiento de los nanotubos de TiO_2 . Algunos investigadores se centran en el mecanismo de crecimiento de los nanotubos con distintas fuentes para la generación de picaduras durante el proceso de anodizado (Ramaripa et al., 2024).

Puga et al. (2022) explican que para las primeras investigaciones en la síntesis de estas nanoestructuras se empleaba el ácido fluorhídrico (HF), sin embargo, el espesor producido por esta sustancia era muy limitado, lo que resultaba en un inconveniente para la exploración en este campo, esta situación provocó el uso de ácidos débiles como ácido fosfórico (H_3PO_4) en solución con agua que contenía iones fluoruro, lo que aumentó relativamente la longitud de las matrices nanotubulares (Yoo & Lee, 2023).

Zakir et al. (2020) señalan que la nanoestructura de los poros en la superficie del titanio, obtenida mediante anodización electroquímica, se ve significativamente influenciada por diversos parámetros, como el potencial aplicado, la temperatura del baño de anodización, la composición del electrolito, el tiempo de anodización, el contenido de agua en el electrolito y la concentración de iones fluoruro. Se ha dedicado considerable atención al estudio del mecanismo de formación de películas nanotubulares de TiO_2 a través de la anodización electroquímica.

1.2.5 Tratamiento Térmico

En términos generales, los óxidos de titanio exhiben una notable estabilidad termodinámica, debido a las energías libres de formación altamente negativas. El proceso fundamental para la generación de nanotubos inicia con la formación de una capa inicial de óxido en la superficie de la aleación, debido a una disparidad de voltaje entre el cátodo y el ánodo (ambos pueden ser de titanio). Posteriormente, se produce un ataque químico que origina pequeñas picaduras en la superficie, las cuales se transforman en poros y desplazan la capa de óxido hacia el interior mediante disolución selectiva.

Cao et al. (2024) hablan sobre el tratamiento térmico para la obtención de nanotubos de TiO_2 , se propone que las dimensiones, morfología y estructura cristalina



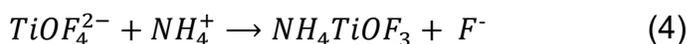
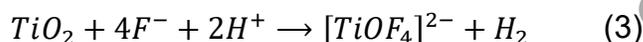
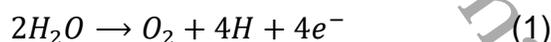
(anatasa o rutilo) de los nanotubos pueden ser manipuladas durante el proceso de anodización electroquímica. Por esta razón, se destaca que la aplicación de un tratamiento térmico posterior, ya que posibilita la modificación de la estructura cristalina de los nanotubos de óxido de titanio. Este tratamiento térmico, según argumentan, tiene el efecto de eliminar el flúor (agente químico atacante) y estabilizar los nanotubos, aumentando así su resistencia a la corrosión, utilizando una temperatura de 300 °C a 800 °C.

1.2.6 Post tratamiento a la fase metaestable

Durante el anodizado de la placa de titanio, se obtienen nanotubos de fluorotitanato de amonio [NH_4TiOF_3], por esta razón se opta por un tratamiento térmico para transformar estos nanotubos en TiO_2 .

Torres et al. (2016) reportaron que la formación de estos nanotubos ocurre durante la reacción de electrolisis rompiendo las moléculas de H_2O , provocando así presencia de oxígeno, incitando una oxidación en la superficie metálica, que, a su vez, los F se concentran alrededor del ánodo por la influencia del campo eléctrico, reaccionando así, con el TiO_2 formado creando una molécula compleja [$TiOF_4$], para al final conducir con una formación de nanotubos de NH_4TiOF_3 .

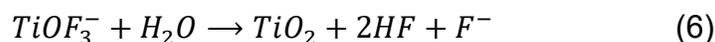
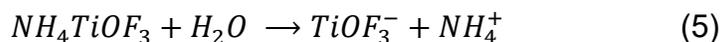
- Mecanismo de reacción:



El método para transformar nanoestructuras de NH_4TiOF_3 a nanotubos de TiO_2 , consiste en sumergir las placas anodizadas en agua pura, para producir una oxidación lenta, volviendo los nanotubos a nanopartículas a temperatura ambiente, donde el agua diluye los nanotubos de NH_4TiOF_3 en TiO_2 y NH_4 , alcanzando una reacción continua con



el agua causando una disminución del pH formando HF, dejando que el flúor y los iones de amonio sean adsorbidos en las paredes de los nanotubos.



1.2.7 Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes (CE) son un grupo de sustancias químicas que han generado una creciente preocupación debido a su presencia en los ecosistemas y en el agua, representando amenazas a largo plazo e impredecibles por su persistencia y capacidad de bioacumulación. Sin embargo, gracias a los avances recientes, se ha logrado detectar estos contaminantes en concentraciones extremadamente bajas, que van desde nanogramos por litro (ng/L) hasta microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$) (Chen et al., 2024).

F. Li et al. (2024) describe a este tipo de compuestos como contaminantes emergentes, teniendo en cuenta que son un grupo de sustancias presentes en concentraciones diminutas, pero con gran impacto ambiental por sus características tóxicas, las trazas detectadas en los cuerpos de agua pueden ser ingeridas para posteriormente ser digeridas por los seres vivos, provocando un peligro potencial para la salud.

Los contaminantes emergentes, como los productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, dioxinas, bifenilos policlorados, pesticidas, antibióticos y plásticos, son considerados contaminantes emergentes debido a su reciente identificación en diversos entornos naturales. Este grupo de contaminantes ha generado preocupación para los suministros de agua a nivel mundial, despertando el interés de la comunidad científica, que busca soluciones para abordar este problema (Sudarsan et al., 2024).

En la Tabla 3 se especifican los principales fármacos considerados como contaminantes emergentes (CE).



Tabla 3

Tipos y fuentes de contaminantes emergentes (fármacos).

Contaminantes emergentes	Fuente de contaminantes emergentes
Paracetamol	Productos farmacéuticos - Analgésicos y antiinflamatorios
Atenolol	Productos farmacéuticos - β -bloqueantes
Azitromicina	Productos farmacéuticos - antibióticos
Bezafibrato	Productos farmacéuticos - Medicamentos hipolipemiantes
Carbamazepina	Productos farmacéuticos - Antiepilépticos
Clofibrato	Productos farmacéuticos - Medicamentos hipolipemiantes
Ácido clofibrico	Productos farmacéuticos
Diclofenaco	Productos farmacéuticos - Analgésicos y antiinflamatorios
Gemfibrozilo	Productos farmacéuticos - Medicamentos hipolipemiantes
Ibuprofeno	Productos farmacéuticos - Analgésicos y antiinflamatorios
Ketoprofeno	Productos farmacéuticos - Analgésicos y antiinflamatorios
Lincomicina	Antibiótico
Lomefloxacin	Antibiótico
Metronidazol	Productos farmacéuticos - antibióticos
Miconazol	Antibiótico
Naproxeno	Productos farmacéuticos - Analgésicos y antiinflamatorios
Norfloxacin	Antibiótico
Ofloxacin	Antibiótico
Propranolol	Productos farmacéuticos - β -bloqueantes
Ranitidina	Productos farmacéuticos - Antiácidos
Sotalol	Productos farmacéuticos - β -bloqueantes
Sulfametoxazol	Productos farmacéuticos - antibióticos
Trimetoprima	Productos farmacéuticos - antibióticos

Nota: Adaptado de “Aplicación del proceso de adsorción para la eliminación eficaz de contaminantes emergentes del agua y las aguas residuales”, por (Rathi & Kumar, 2021).



1.2.8 Aspirina como contaminante emergente

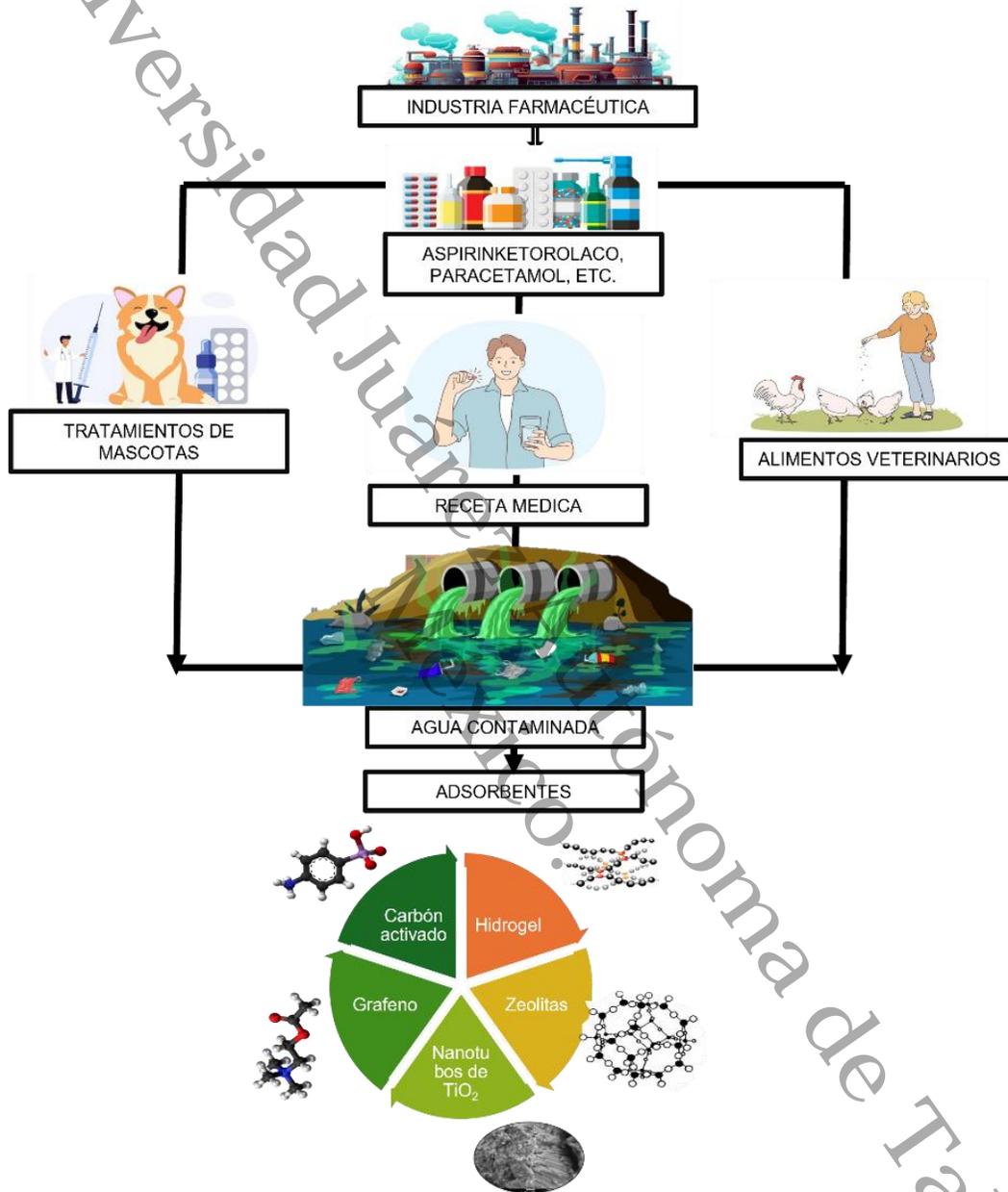
De acuerdo con Liang et al. (2022) el aumento de enfermedades infecciosas e inflamatorias ha provocado un crecimiento en la demanda de diversos productos farmacéuticos, entre los cuales se incluye la aspirina (ácido acetilsalicílico), un antiinflamatorio no esteroide ampliamente utilizado como antipirético, analgésico y antiinflamatorio. En la actualidad, se producen y utilizan cada año 35.000 toneladas de aspirina en todo el mundo.

No obstante, Parolini (2020) señala que la aspirina ha sido uno de los analgésicos más prescritos a nivel mundial en la atención médica humana durante más de 90 años. Este compuesto, al entrar al organismo, se somete a reacciones metabólicas hepáticas. Causando una transformación de hasta un 80%, siendo el resto expulsado a través los desechos corporales, como resultado, se ha detectado en niveles máximos de 1,5 y 3,1 $\mu\text{g/L}$, e incluso se encontraron concentraciones de hasta 59,6 $\mu\text{g/L}$ en plantas de tratamiento de aguas residuales en España.

Investigaciones han demostrado que la aspirina tiene efectos teratogénicos en ratas, ya sea por fórmula original o por alguno de sus metabolitos como el ácido salicílico, lo que significa que puede provocar malformaciones congénitas al alterar el desarrollo del embrión y el feto o en su defecto retraso en el nacimiento y un aumento en la mortalidad fetal. Un estudio reveló que la aspirina reduce la eficiencia de la respuesta del cortisol en la tilapia de Mozambique, una hormona esteroide para regular el metabolismo y la respuesta del sistema inmunológico (Nordin et al., 2024).

En la Figura 2 se puede observar la liberación en el agua de los fármacos que se utilizan en las recetas médicas, terapias para mascotas y alimentos veterinarios.

Figura 2
Fuentes de fármacos antiinflamatorios no esteroides en el medio acuático.



Nota. Adaptado de " Aparición, toxicidad, impacto y eliminación de determinados fármacos antiinflamatorios no esteroides (AINE) ", por (Huynh et al., 2023).



Hybiak et al. (2020) describen AAS (aspirina) como un compuesto activo con propiedades antiinflamatorias y analgésicas, lo que convierte en parte del grupo de los (AINE), además, cuya composición principal radica en la síntesis de ácido salicílico o salicina, alguna de sus propiedades se describe en la Tabla 4.

Tabla 4

Principales propiedades fisicoquímicas del AAS.

Aspirina	
Fórmula	$C_9H_8O_4$
Masa molar (g/mol)	180.158
Solubilidad en agua (g/L a 25 °C)	1.46
pka	3.49

1.2.9 Toxicidad aguda y *Vibrio Fischeri*

La toxicidad aguda hace referencia a los efectos negativos que se manifiestan en un período breve tras la exposición a una sustancia tóxica, generalmente en un lapso de horas o días, en relación con el ciclo de vida de los organismos. Estos efectos suelen estar relacionados con agentes químicos a los que se ven expuestos los organismos acuáticos (Sobanska et al., 2024).

La exposición a sustancias químicas presentes en el ambiente puede generar toxicidad en las personas, con una gravedad que varía según el tipo de sustancia, su concentración, la vía de exposición, la duración y la susceptibilidad de cada individuo. Los pesticidas, por ejemplo, suponen riesgos tanto para la salud humana como para el entorno natural. Para esto es muy importante la bacteria bioluminiscente *Vibrio fischeri*, ya que, son utilizadas para estimar los riesgos toxicológicos de los contaminantes químicos que se encuentran en la biósfera (Fang et al., 2019).

La evaluación de la toxicidad es crucial para garantizar la seguridad de los compuestos químicos y los nuevos tratamientos. Los efectos pueden ir desde síntomas



leves hasta situaciones graves o potencialmente mortales, dependiendo del nivel de exposición, estas evaluaciones son esenciales para clasificar y gestionar los riesgos asociados a sustancias tóxicas, siendo un requisito de las agencias regulatorias a nivel mundial (Luo et al., 2024).

Ge et al. (2024) señala que investigaciones recientes definen la toxicidad aguda como la capacidad de una sustancia química para provocar efectos adversos inmediatos en organismos vivos tras una exposición breve. En este marco, la bacteria luminiscente *Vibrio fischeri* (también conocida como *Allivibrio fischeri*), se ha establecido como un organismo modelo en estudios de toxicidad, ya que es una bacteria marina que emite luz como parte de su metabolismo natural, un fenómeno conocido como bioluminiscencia.

Las pruebas con *Vibrio fischeri* han sido ampliamente utilizadas, ya que requieren tiempos de contacto breves, de 15 o 30 minutos y se encuentran bajo la norma ISO 11348-1-2007. En México, su evaluación se rige por la norma NMX-AA-112-SCFI-2017, que aplica al análisis de agua y sedimentos para determinar toxicidad aguda. No obstante, los antibióticos afectan procesos microbianos a largo plazo, como el crecimiento y la reproducción, lo que limita la utilidad de las pruebas de toxicidad aguda para evaluar su impacto.

El bioensayo de inhibición de la luminiscencia de *Vibrio fischeri* presenta varias ventajas, como su alta sensibilidad, la corta duración del ensayo, su aplicabilidad a diversos tipos de matrices y una buena correlación con otras pruebas (Milenković et al., 2021).

1.2.10 Pruebas de toxicidad

En los ensayos biológicos, el principio básico es que los organismos vivos son empleados como herramientas clave para evaluar la calidad ambiental y del agua, ya que ellos están expuestos a los efectos combinados de la ecotoxicidad. Este enfoque busca seguir protocolos basados en normas internacionales, que guíen a las entidades reguladoras en la toma de decisiones.

En la Tabla 5 se detallan las especies más utilizadas en estos ensayos, que incluyen desde peces hasta bacterias.



Tabla 5
Ensayos biológicos con diferentes organismos.

Nombre	Descripción
<i>Danio Rerio</i> (Peces)	<p>Es una especie pequeña de pez tropical que se utiliza como organismo modelo en diversos campos de investigación, tales como biología del desarrollo, toxicología y farmacología.</p> <p>-Ventajas: Sus embriones transparentes, alta capacidad reproductiva, rápido desarrollo, ciclo de vida corto y bajo costo de mantenimiento en laboratorio.</p> <p>-Uso: Pruebas de toxicidad embrionaria (FET) permite evaluar los efectos de diferentes contaminantes, como nanomateriales, pesticidas, productos químicos industriales y farmacéuticos, y metales pesados, facilitando la investigación en toxicología ambiental.(Canedo et al., 2022)</p> <p>-Norma mexicana: NMX-AA-207-SCFI-2016. Método para la evaluación de la toxicidad aguda en organismos acuáticos, utilizando como especie de prueba el <i>Danio Rerio</i> (pez cebra).</p> <p>-Norma internacional: ISO 15088:2007. Determinación de la toxicidad aguda de las aguas residuales para huevos de pez cebra.</p>
<i>Daphnia Magna</i> (Invertebrados)	<p>Es una especie conocida como la pulga de agua, es un <i>crustáceo zooplancton</i> que habita en ecosistemas de agua dulce estancada.</p> <p>-Ventajas: Fácil mantenimiento y reproducción en laboratorio, alta tasa de supervivencia y su bajo requerimiento de infraestructura y tiempo.</p> <p>-Uso: Estudios toxicológicos, de desarrollo evolutivo y en programas de biomonitoreo. El bioensayo con <i>D. Magna</i> se</p>



	<p>emplea en muchos países para evaluar la calidad del agua de ecosistemas acuáticos, especialmente en la detección de contaminantes como los metales pesados (Ghosh et al., 2024).</p> <p>Cardona Gallo et al. (2018), analizaron diferentes fuentes que subrayan la toxicidad de ciertos compuestos, para la vida acuática en los que destacan los colorantes y tintes.</p> <p>-Norma: NMX-AA-087-SCFI-2010. Análisis de agua-Evolución de toxicidad aguda con <i>Daphnia Magna, straus</i> (<i>Crustacea Cladocera</i>). Método de prueba (cancela la NMX-AA-087-SCFI-1995).</p> <p>-Norma internacional: ISO 6341: 2012. Determinación de la movilidad de <i>Daphnia Magna</i>. Prueba de toxicidad aguda</p>
<p><i>Pseudokirchneriella</i> <i>Subcapitata</i> (Algas)</p>	<p>Es una microalga comúnmente utilizada como bioindicador en ambientes de agua dulce. Se emplea para evaluar la presencia de nutrientes y detectar contaminantes químicos peligrosos, gracias a su sensibilidad a diversas sustancias tóxicas.</p> <p>-Ventajas: Presenta una mayor tasa de crecimiento y una mayor sensibilidad a diversas toxinas en comparación con otras algas.</p> <p>-Uso: Estudios en estudios de toxicidad ambiental, tanto en pruebas de toxicidad aguda como crónica, para evaluar la calidad del agua. Esta especie es altamente sensible a diversos contaminantes, incluidos metales pesados, pesticidas y productos químicos industriales, siendo utilizada principalmente en investigaciones ecotoxicológicas en ambientes de agua dulce (Lotfi et al., 2022).</p> <p>-Norma: PROY-NMX-AA-188-SCFI-2019. Análisis de agua y sedimentos-Evaluación de toxicidad crónica con <i>Pseudokirchneriella Subcapitata</i>. Método de prueba.</p>

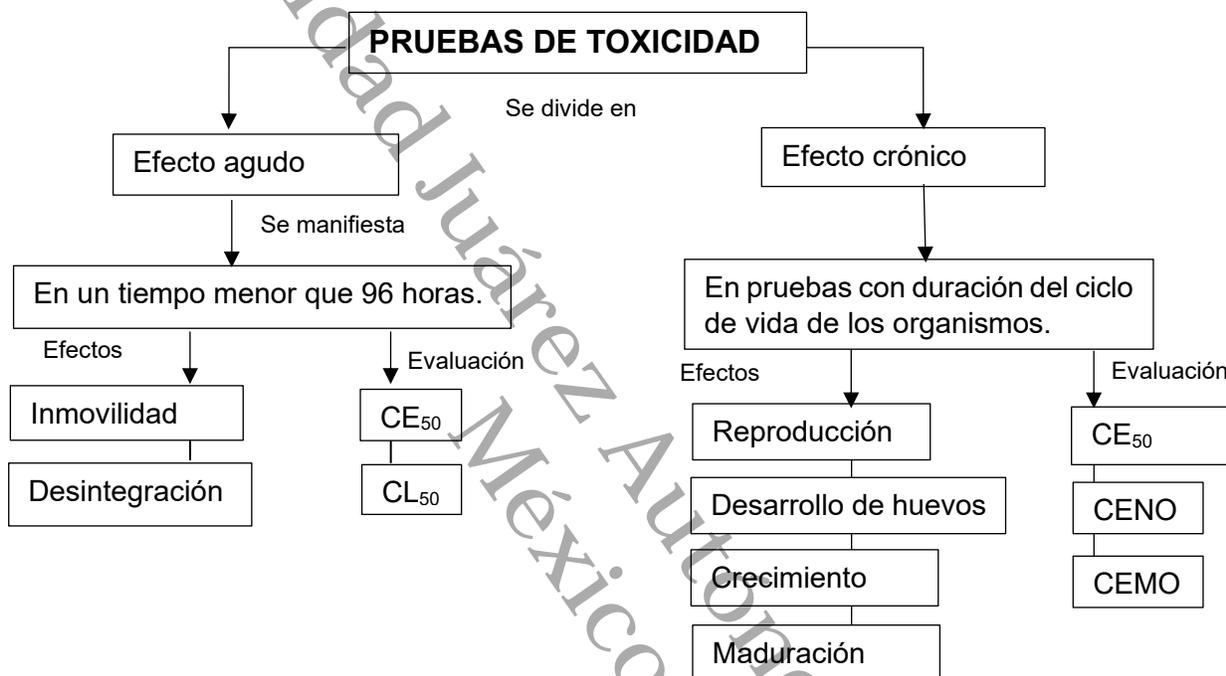


	<p>-Norma internacional: ISO 8692:2012. Prueba de inhibición del crecimiento con alga de agua dulce con alga verde unicelular.</p>
<p><i>Vibrio Fischeri</i> (Bacterias)</p>	<p>Es una bacteria marina que produce bioluminiscencia como resultado de su actividad metabólica. Esta especie es reconocida por establecer una relación simbiótica con el calamar hawaiano <i>Euprymna scolopes</i> (Tischler et al., 2021).</p> <p>-Ventajas: Es extremadamente sensible a la presencia de contaminantes, lo que facilita la detección de toxinas en concentraciones muy bajas. Además, ofrece resultados en un tiempo reducidos y tiene aplicaciones en muestras, como agua, sedimentos y suelos.</p> <p>-Uso: Se utiliza para evaluar la calidad del agua en ecosistemas acuáticos, detectando contaminantes como metales pesados, pesticidas, productos farmacéuticos, etc. Para facilitar el ensayo de bioluminiscencia, se emplean equipos como el Microtox, que incluye pozos para realizar las diluciones de las suspensiones bacterianas (Cardona Gallo et al., 2018).</p> <p>-Norma: NMX-AA-112-SCFI-2017. Análisis de agua y sedimentos. Evaluación de toxicidad aguda con <i>Vibrio Fischeri</i>. Método de prueba (cancela la NMX-AA-112-SCFI-1995).</p> <p>-Norma internacional: ISO 11348:2007. Determinación del efecto de inhibición de la emisión de luz de la bacteria <i>Vibrio Fischeri</i>, en muestra de agua.</p>

En la Figura 3 se ilustra la clasificación de las pruebas de toxicidad en diferentes categorías, de acuerdo con el manual del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (Pica Granados & Lerdo de Tejada Brito, 2003).

Figura 3

Diagrama de pruebas de toxicidad de acuerdo con el (IMTA).



1.3 Justificación

Se sabe que la industria farmacéutica ha sintetizado un gran número de medicamentos con los cuales, han logrado contrarrestar diferentes tipos de enfermedades, aumentando así la expectativa de vida, esto debido a los grandes descubrimientos de las vacunas antitetánica y antidiftérica (Hasani et al., 2023). Sin embargo, no es novedad que la contaminación de los medios acuáticos ha sido un tema de mucha preocupación en los últimos años, esto debido a las actividades antropogénicas que causan problemas ambientales a nivel mundial.

Según Rangappa et al. (2024), mencionan que entre los contaminantes se encuentran colorantes, pesticidas, fármacos, fenoles, entre otros, los cuales están



causando un revuelo ante las autoridades pertinentes, denominándolos contaminantes emergentes (CE). Muchas de estas aguas son enviadas a plantas de tratamiento, aunque la mayoría no están diseñadas o no poseen la capacidad para remover todos estos contaminantes, esto sin mencionar que la regulación de los contaminantes fármacos escasea en este sector, no obstante uno de los retos en la actualidad, es la reducción de los contaminantes emergentes cuya presencia en el medio ambiente pasan inadvertidos; y que hoy en día es un problema que afecta a los ríos y a las plantas de tratamiento de aguas residuales. Las tabletas de Aspirina en el cuerpo humano solo pueden ser degradadas hasta en 80% por lo que lo demás pasa a las aguas residuales.

Como resultado de esta investigación se propone una alternativa para el tratamiento de cuerpos de agua, usando capas de nanotubos TiO_2 adheridas a láminas de titanio obtenidas por anodización como adsorbente, con el fin de obtener un material con propiedades adsorbentes sin un proceso posterior, evitando la contaminación con el mismo, buscando disminuir la presencia la aspirina en el agua, debido a que es uno de los contaminantes más comunes que se ha detectado en análisis previos en zonas acuáticas.

1.4 Preguntas de Investigación

- ¿Cuál es el origen de los contaminantes emergentes?
- ¿Es posible obtener una fase metaestable de óxido de Ti mediante anodizado Ti?
- ¿Es posible la adsorción de la aspirina en nanotubos de TiO_2 por anodizado?
- ¿El tratamiento de agua contaminada con aspirina con nanotubos y su posterior tratamiento con TiO_2 obtenido por anodizado disminuye la toxicidad de aspirina en el agua?
- ¿Las pruebas de toxicidad aguda utilizando *Vibrio fischeri* son una prueba efectiva para la determinación de toxicidad en agua?



1.5 Hipótesis

Mediante la técnica de anodizado es posible obtener el fluorotitanato de amonio $[NH_4TiOF_3]$, una fase metaestable, que permite a través de su oxidación, obtener la fase anatasa del TiO_2 , prescindiendo así de tratamiento térmico; la nueva fase en cuestión presenta propiedades adsorbentes que permiten la adherencia del compuesto aspirina, en un medio acuoso, sobre las superficies de los nanotubos de TiO_2 , logrando con esto disminuir la toxicidad provocada por este fármaco.

1.6 Objetivo general

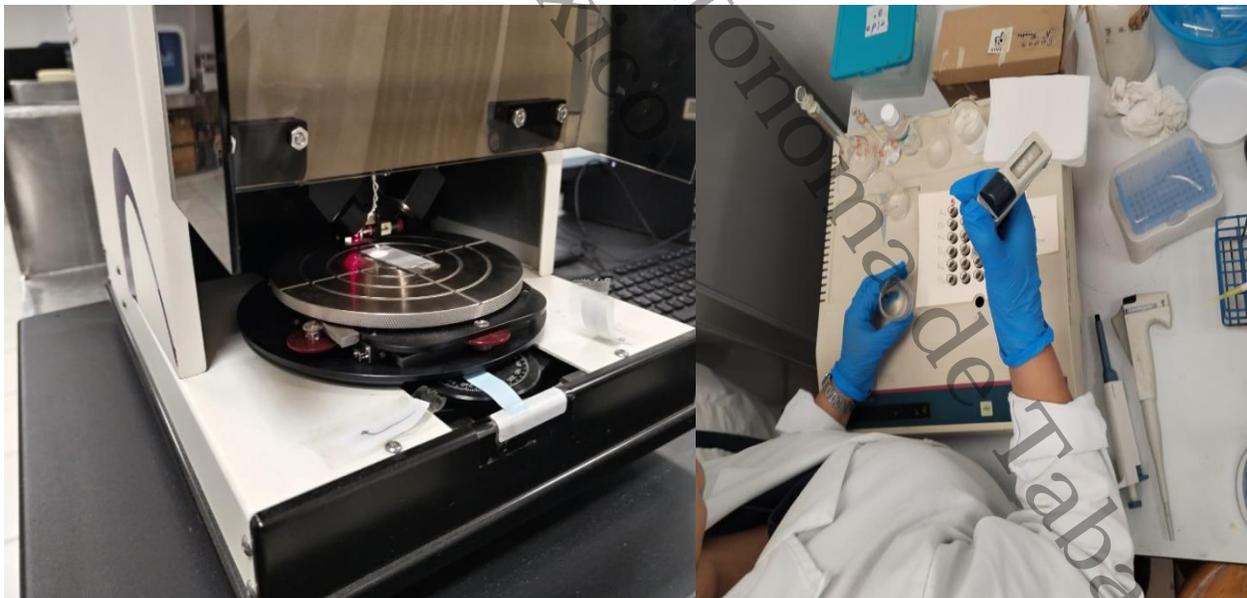
Obtener nanoestructuras de TiO_2 sobre láminas metálicas de titanio mediante anodizado electroquímico que actúen como adsorbentes para la reducción de la concentración de ácido acetilsalicílico en un medio acuoso y disminuir su toxicidad.

1.7 Objetivos específicos

- Sintetizar nanotubos de TiO_2/Ti mediante anodizado de Ti .
- Estudiar la influencia del tiempo en el crecimiento de las capas de TiO_2 que recubren la placa de titanio en el anodizado.
- Determinar la toxicidad de la solución acuosa tratada por medio de una prueba de *Vibrio Fischeri*.
- Identificar la morfología y rugosidad de las placas anodizadas a diferentes tiempos.
- Analizar las propiedades de adsorción de los nanotubos de TiO_2 para la disminución de la concentración de ácido acetilsalicílico en la solución tratada.



CAPÍTULO II METODOLOGÍA



2.1 Metodología obtención de nanotubos TiO_2 por proceso de anodizado electroquímico.

2.1.2 Elaboración de solución orgánica

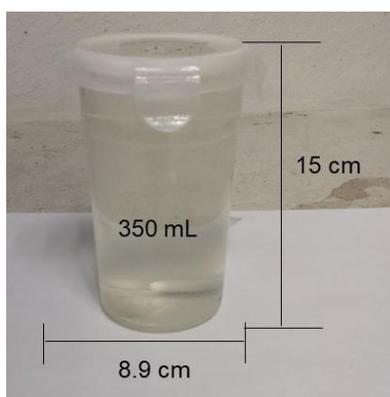
Para desarrollar nanotubos de TiO_2 mediante una solución electrolítica, se preparó un medio orgánico compuesto por el siguiente electrolito:

Etilenglicol ($C_2H_6O_2$) 98% V/V, agua (H_2O) 2% V/V y fluoruro de amonio (NH_4F) 0.3% %P/P (Figura 4).

- Se emplea un recipiente plástico con una capacidad de 350 mL, cuyas dimensiones son 15 cm de altura y 8.9 cm de diámetro.
- Se mide y agrega el 98% del volumen total de etilenglicol, equivalente a 343 mL.
- Posteriormente, se incorpora agua destilada, completando los 350 mL con 7 mL adicionales.
- Finalmente, se pesa 1.16 g de fluoruro de amonio (NH_4F) utilizando una balanza analítica para completar la mezcla (ver cálculos en Anexo 1).

Figura 4

Solución orgánica.



2.1.3 Anodizado

Para llevar a cabo el experimento, se utilizan láminas de titanio (Ti) como ánodo y cátodo para la obtención de nanotubos de TiO_2 . La preparación del ánodo incluye un procedimiento de sandblasting con alúmina (Al_2O_3), lo que mejora la adherencia de los nanotubos al generar una superficie rugosa en la placa. La Figura 5 se ilustra uno de los ánodos utilizados, siendo importante mencionar que el material empleado proviene de desechos o residuos de la industria.

Figura 5

Placa de Ti (ánodo).



2.1.4 Cátodo

Los cátodos empleados también son de titanio (Ti); sin embargo, a diferencia del ánodo, el cátodo se somete a un proceso de pulido para optimizar la eficiencia durante el anodizado al utilizar ambos electrodos de titanio (Figura 6).

Figura 6

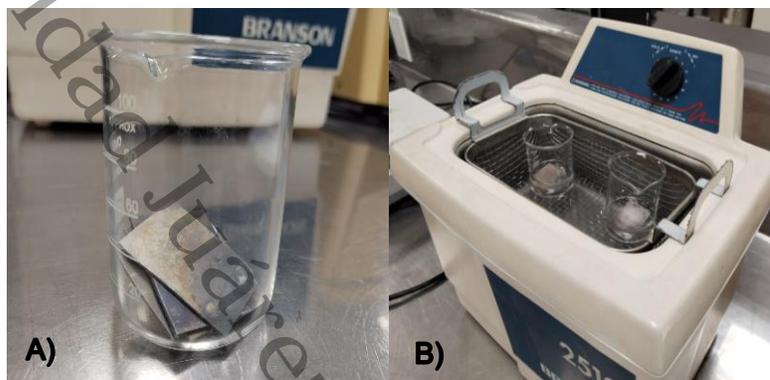
Placa de Ti (cátodo).



Seguidamente, todas las láminas fueron sonicadas en agua desionizada en un tiempo de 45 min utilizando el equipo sonicador BRANSON 2510, con el objetivo de eliminar los residuos (ver Figura 7).

Figura 7

A) Láminas de Ti (ánodo) con residuos y B) sonicado de cátodo en el equipo.



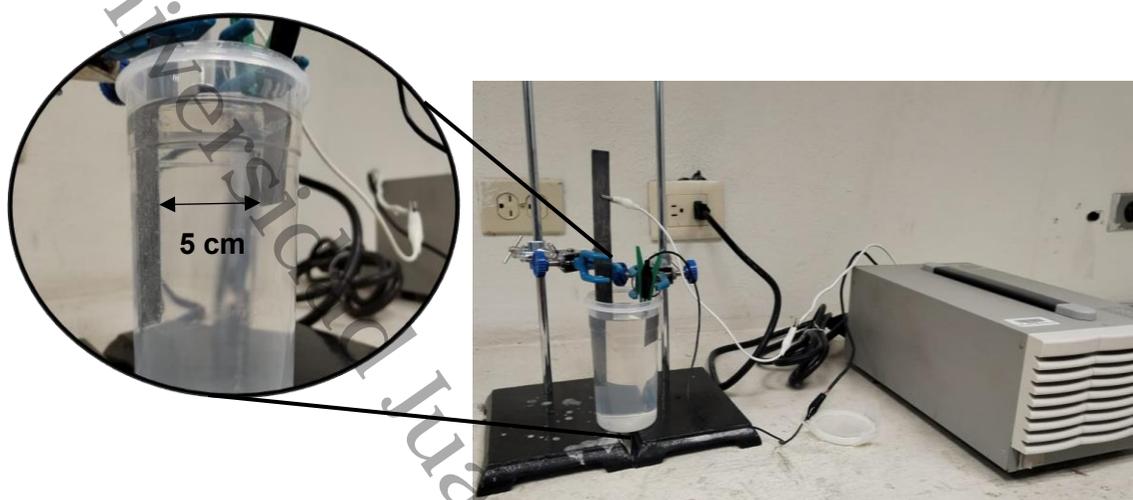
2.1.5 Montaje del experimento

Para obtener nanotubos de TiO_2 se utiliza el método de anodizado-disolución, basado en investigaciones previas. Dentro de las metodologías reportadas, existen diversas técnicas que implican materiales electrocatalíticos, destacando el papel del potencial de anodización. Se ha observado que, al variar este potencial entre 10 y 20 V, se generan características de nanotubos huecos con diferencias en el grosor de las paredes y la longitud del tubo (David et al., 2022).

El montaje experimental requiere un equipo compuesto por dos soportes universales y pinzas de tres dedos para sujetar el ánodo y el cátodo. Se utilizaron pinzas de plástico para asegurar las placas y evitar la oxidación de los caimanes, minimizando así la contaminación de la solución orgánica. Ambos electrodos se sumergen y conectan a la fuente de poder GUS INSTEK PSW-250-13.5, ubicada en el Laboratorio de Instrumentación y Control de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA), donde se aplica corriente a la solución orgánica, manteniendo una distancia entre ánodo y cátodo de aproximadamente 5 cm, y el área anodizada de cada placa es de 5 cm^2 (Figura 8).

Figura 8

Método experimental de para obtención de TiO_2 .



Para aplicar energía desde la fuente de poder, se establece un voltaje de rampa según lo indicado en la Tabla 6. El proceso inicia con 6V en $t=0$ min y se incrementa de manera gradual a una tasa de 6 V/min durante un periodo de 9 minutos, hasta alcanzar un voltaje máximo de 60 V, el cual se mantiene constante hasta retirar ambas placas.

Tabla 6

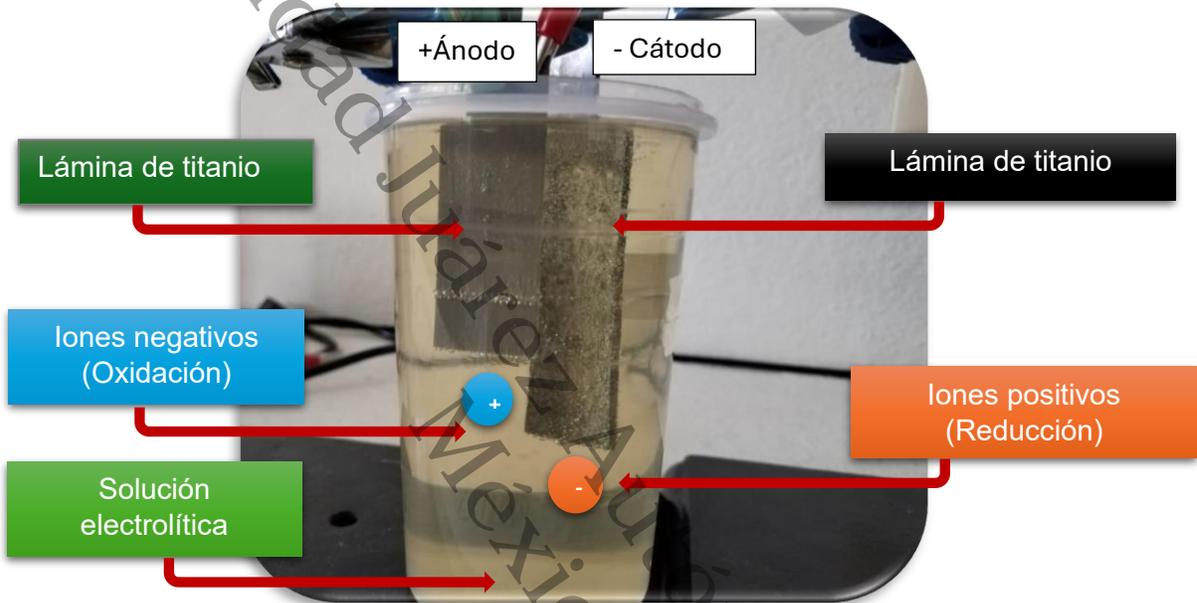
Voltaje vs tiempo para el anodizado de las placas.

Anodizado de placas de titanio	
Voltaje (V)	Tiempo (min)
6	0
12	1
18	2
24	3
30	4
36	5
42	6
48	7
54	8
60	9

Se realizan anodizados en las placas de titanio con distintos tiempos de exposición, que abarcan periodos de 2, 4, 6 y 8 horas. La Figura 9 presenta los componentes principales de la celda electroquímica utilizada en el proceso.

Figura 9

Esquema de la celda electroquímica.



Finalmente, durante el anodizado de la placa de titanio, se obtienen nanotubos de fluoruro titanato de amonio (NH_4TiOF_3), para convertir estos nanotubos en TiO_2 , se debe optar por un tratamiento post metaestable. Según Torres et al. (2016), la formación de estos nanotubos ocurre mediante una reacción de electrólisis que descompone las moléculas de H_2O , generando oxígeno y provocando una oxidación en la superficie metálica.

En la mayoría de los estudios, la obtención de nanotubos implica un tratamiento térmico que alcanza temperaturas de hasta $480\text{ }^\circ\text{C}$ para transformar las estructuras en la fase anatasa en las placas de TiO_2 . Sin embargo, en este trabajo se innova al reducir el consumo energético asociado al tratamiento térmico, optando por sumergir la placa en 80 mL de agua durante un periodo de 96 horas, logrando así la formación de la fase

cristalina anatasa. La Figura 10 muestra los resultados obtenidos tras este procedimiento.

Figura 10

Tratamiento post metaestable de 96 h.

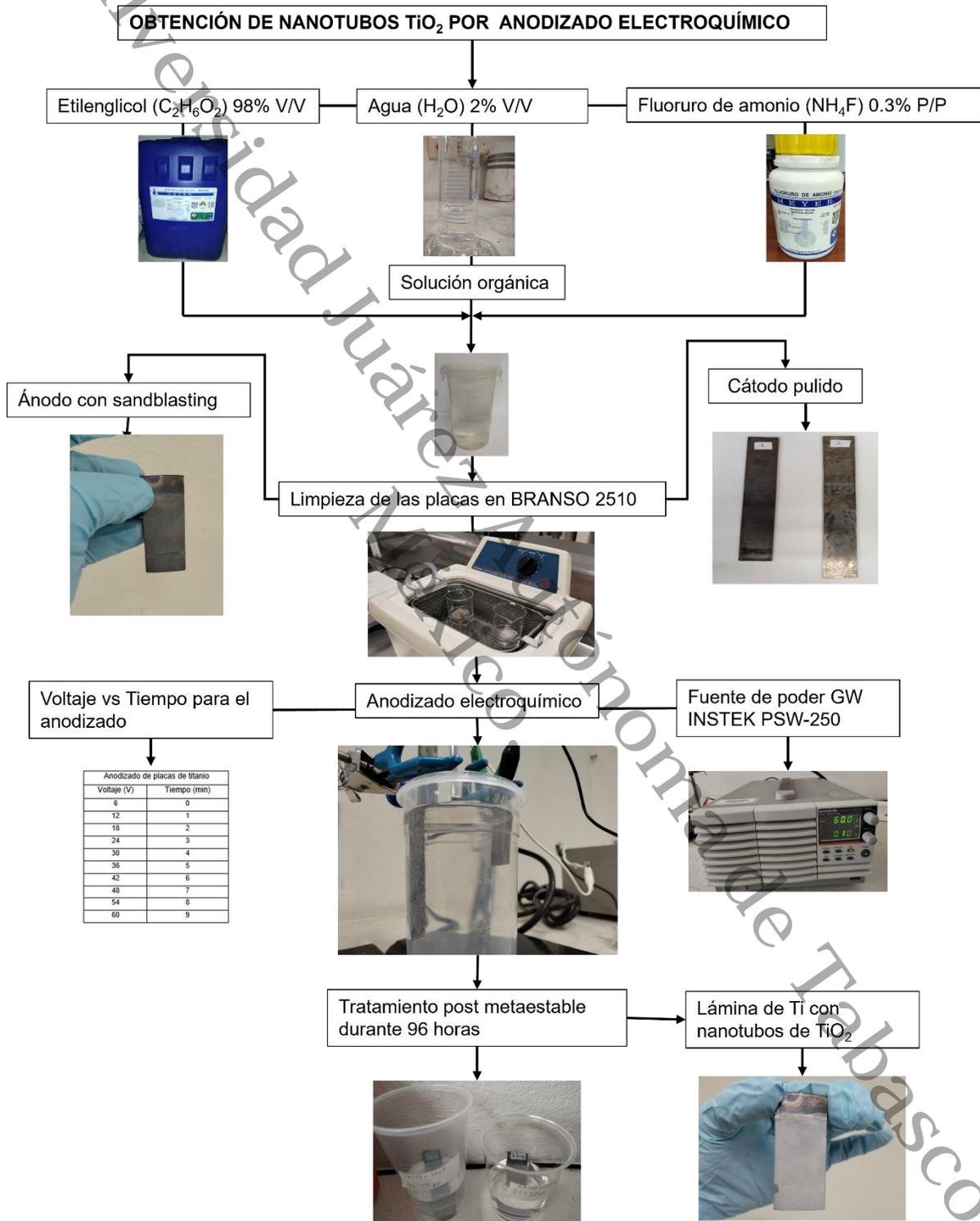


2.1.6 Resumen obtención de nanotubos TiO_2 .

La Figura 11 permite identificar cada una de las fases involucradas en la producción de nanotubos de TiO_2 .

Figura 11

Diagrama de método experimental obtención de nanotubos de TiO_2 .



2.2 Metodología de la adsorción de la molécula

En esta sección, se aborda la adsorción como método para tratar una muestra contaminada de aspirina. Debido a la posible presencia de esta contaminación en el medio ambiente, la adsorción se considera un proceso en el que las moléculas se adhieren o quedan retenidas en la superficie de una placa anodizada con propiedades adsorbentes, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Placas con el recubrimiento de TiO_2 en diferentes tiempos (2h, 4h, 6h y 8h).



2.2.1 Muestra

El tema de interés se centra en la adsorción como método para el tratamiento de una muestra de agua contaminada de aspirina (Figura 13).

Figura 13

Tabletas de aspirina caducada en Jul / 23.



2.2.2 Cámara de adsorción

El dispositivo utilizado en este método se construye con madera y está cubierto con pintura negra para crear una cámara completamente oscura (Figura 14).

Figura 14

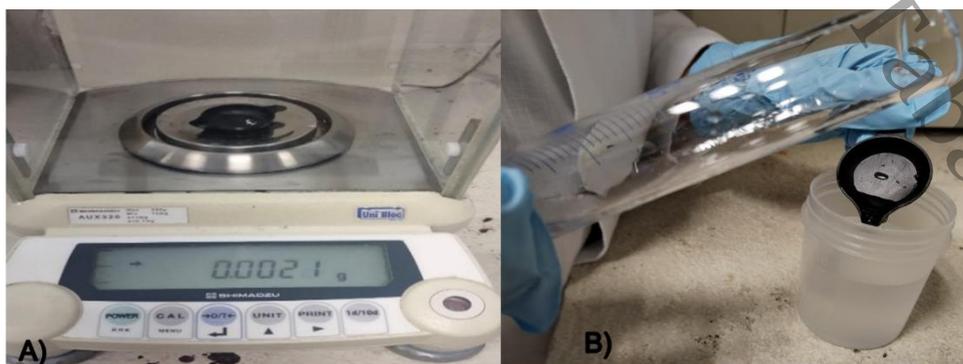
Cámara de adsorción a) vista lateral y b) vista frontal.



Para el procedimiento, se elabora una solución con una muestra sintética de 100 mL de agua desionizada con 0.002 g de aspirina, que representa una concentración de 20 ppm (ver Figura 15). Durante el proceso, se conecta una manguera a una bomba de agua para generar agitación mediante burbujeo, lo que facilita la activación de la superficie adsorbente al generar radicales de oxígeno que mejoran su capacidad electroactiva.

Figura 15

a) Pesaje de muestra de aspirina y b) disolución de la muestra.



La solución se introduce en la cámara de adsorción considerando que, para soluciones acuosas, 20 ppm corresponde a 20 mg de sustancia disuelta por cada litro de agua, asumiendo una densidad aproximada de 1 g/mL. Por lo tanto, 20 ppm, que significa 20 mg de sustancia por cada litro de solución Figura 16.

Esta concentración se selecciona para simular condiciones ambientales, ya que, aunque es baja, permite realizar análisis en un entorno controlado sin sobresaturar la muestra. Además, el uso de esta concentración estandarizada facilita la comparación de resultados entre estudios y su alineación con las normas regulatorias.

Figura 16

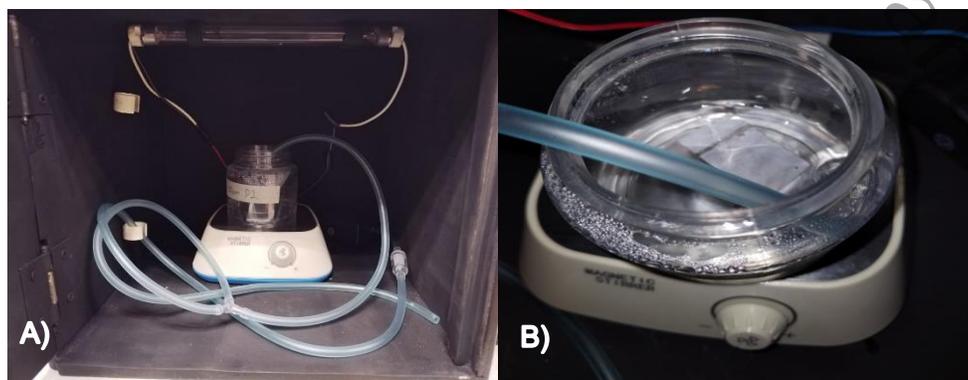
Solución de 20 ppm de aspirina.



A continuación, se introdujo el adsorbente, una placa con superficies de nanotubos de TiO_2 , en la muestra contaminada y se desarrolla la prueba en completa oscuridad durante un periodo de 30 minutos, como se ilustra en la Figura 17.

Figura 17

A) Adsorción de la molécula de ácido acetilsalicílico vista frontal y B) vista superficial.



2.2.3 Resumen adsorción de la molécula de ácido acetilsalicílico (aspirina)

La Figura 18 muestra un diagrama detallado que describe el proceso de adsorción de la molécula de ácido acetilsalicílico.

Figura 18

Diagrama de adsorción de la molécula de ácido acetilsalicílico.



2.3 Determinación del perfil de las placas anodizadas

Para determinar la superficie de las placas anodizadas con tiempos de 2 h, 4 h, 6 h y 8 h, se utiliza el perfilómetro óptico D-500-KLA-TENCOR, un equipo computarizado de alta precisión que mide características como la altura de escalones, la rugosidad y la ondulación en diversos materiales. Este dispositivo tiene la capacidad de medir alturas de escalones desde menos de 10 angstroms hasta 1,2 mm. Además, incorpora un mecanismo óptico para la medición de altura por deflexión y un sistema de control de fuerza magnetoestático, lo que permite el uso de una aguja de baja fuerza, tan pequeñas como 0,03 mg, convirtiéndolo en uno de los perfilómetros de sobremesa más avanzados.

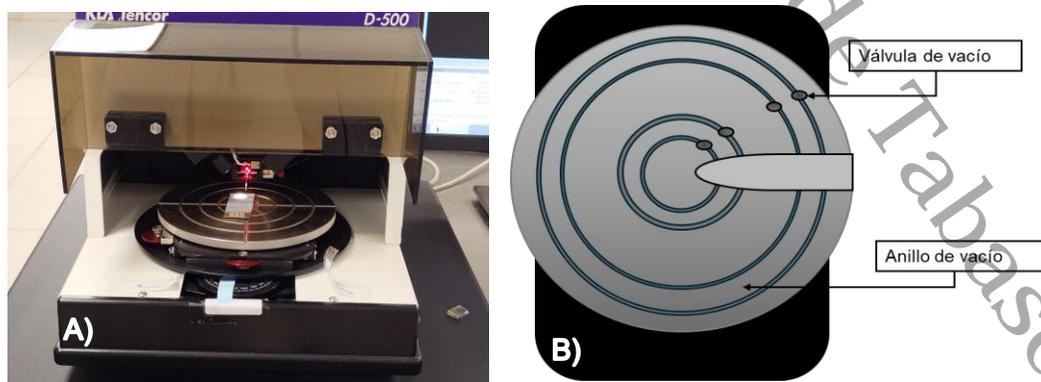
El equipo se emplea para evaluar el grosor de la capa de óxido de titanio, siendo clave calcular el factor de rugosidad (R_q), que se obtiene mediante el promedio de cinco mediciones por cada placa. Este procedimiento permite evaluar la homogeneidad en el crecimiento de la capa de nanotubos de TiO_2 y determinar la adherencia sobre la superficie laminar.

Los pasos realizados incluyen:

1. Abrir la tapa de la platina de muestra y colocar la muestra sobre la mesa de la platina (ver Figura 19).

Figura 19

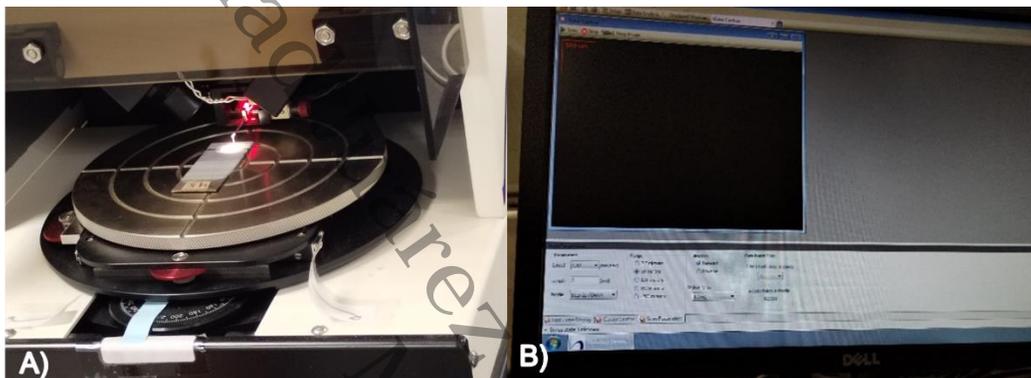
A) Perfilómetro óptico D-500-KLA-TENCOR y B) mesa del perfilómetro D-500.



2. Se verifica que la muestra esté correctamente posicionada bajo la aguja, utilizando los controles para descender hasta que la aguja sea visible claramente en la ventana de video (ver Figura 20).

Figura 20

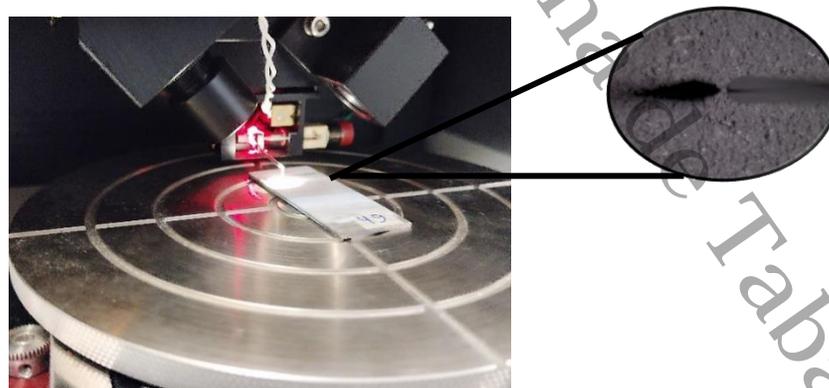
A) Placa de titanio analizada por el perfilómetro. B) programa de perfilómetro



3. Se ajusta el descenso de la aguja de forma lenta para evitar que impacte contra la superficie de la muestra, lo que podría ocasionar daños (ver Figura 21).

Figura 21

Representación de preparación del análisis de superficie de la placa de titanio.

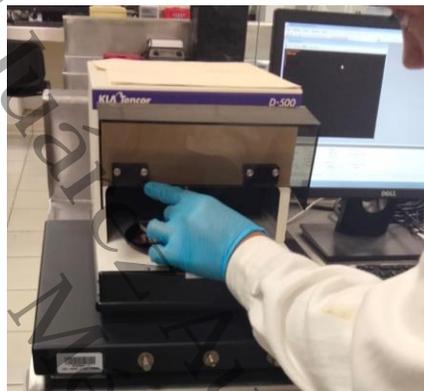


4. El localizador de precisión se configura, generalmente, en la posición inicial 0, y se emplean pasadores de localización para muestras con un diámetro de 2 pulgadas.

5. Se cierra la tapa de la puerta de la platina de muestra.
6. La posición de la platina XY y el movimiento vertical de la platina Z del cabezal de medición se manejan mediante el cursor, utilizando los controles de flecha en la dirección deseada. La rotación de la platina o de la muestra se ajusta manualmente (ver Figura 22).

Figura 22

Manejo del posicionamiento para el análisis de distinto puntos de la superficie.



2.3.1 Resumen perfilometría de las placas

La Figura 23 presenta un esquema detallado que describe la metodología empleada para realizar la perfilometría en las láminas de titanio anodizadas, utilizando el equipo óptico D-500-KLA-TENCOR.

Figura 23

Diagrama de metodología de perfilometría de las placas.



2.4 Análisis de adsorción de luz UV-Vis

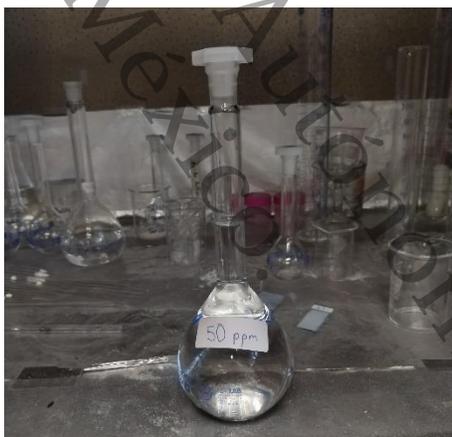
2.4.1 Elaboración de curva de calibración

Para determinar los niveles de concentración en cada muestra, se elabora primero una solución madre de ácido acetilsalicílico con una concentración de 20 ppm. Posteriormente, se preparan disoluciones a diferentes concentraciones (por ejemplo, 50 ppm), utilizando matraces aforados específicos para cada concentración (ver Figura 24).

Las mediciones de las diferentes concentraciones se realizan con el espectrofotómetro UV-Vis Agilent Modelo 8453, configurado para trabajar a una longitud de onda de 231 nm, obteniendo así los resultados correspondientes para cada concentración analizada.

Figura 24

Solución madre para la curva de calibración.



El análisis de absorción de luz UV-Vis se utiliza para cuantificar la presencia de aspirina en las muestras. Para realizar las mediciones correctamente, se siguen estos pasos:

- En el panel frontal del espectrofotómetro, un indicador muestra diferentes colores según el estado del instrumento (ver Figura 25).



Figura 25

El instrumento está preparado para medir.



- Se mueve la palanca del cerrojo hacia arriba hasta alcanzar su posición más elevada (Figura 26).

Figura 26

Vista lateral del espectrofotómetro.

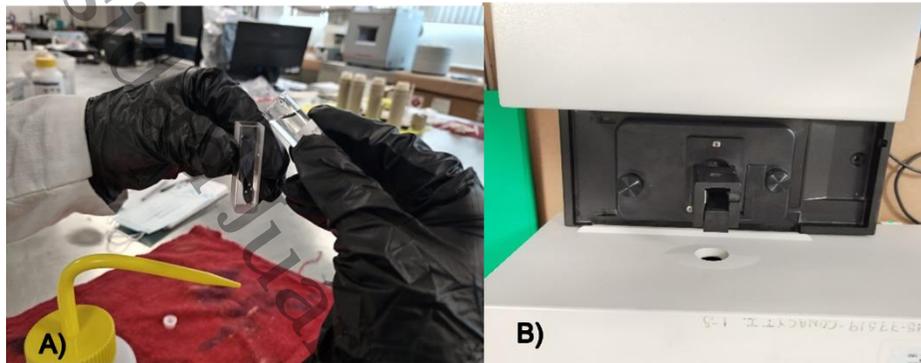


- Se coloca la celda de cuarzo que contiene la muestra problema, asegurándose de que no existan burbujas en el cristal y que esté posicionada correctamente. Es

esencial verificar que los lados opacos de la celda no interfieran con el paso del haz de luz (ver Figura 27).

Figura 27

A) Muestra agregada en la celda de cuarzo y B) condiciones de operación.



- La celda con la muestra de interés se coloca en su posición y se baja la palanca para asegurar que quede correctamente centrada en el paso de luz (ver Figura 28).

Figura 28

Análisis de absorción UV-Vis.

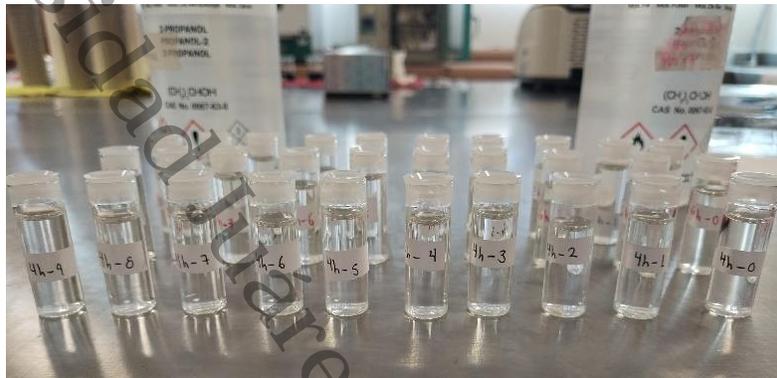


- Una vez terminado el muestreo, se retira el vial y se devuelve al recipiente de origen.

- El procedimiento se repite para cada una de las muestras adsorbidas correspondientes a las distintas placas (ver Figura 29).

Figura 29

Muestras analizadas por el UV-Vis.



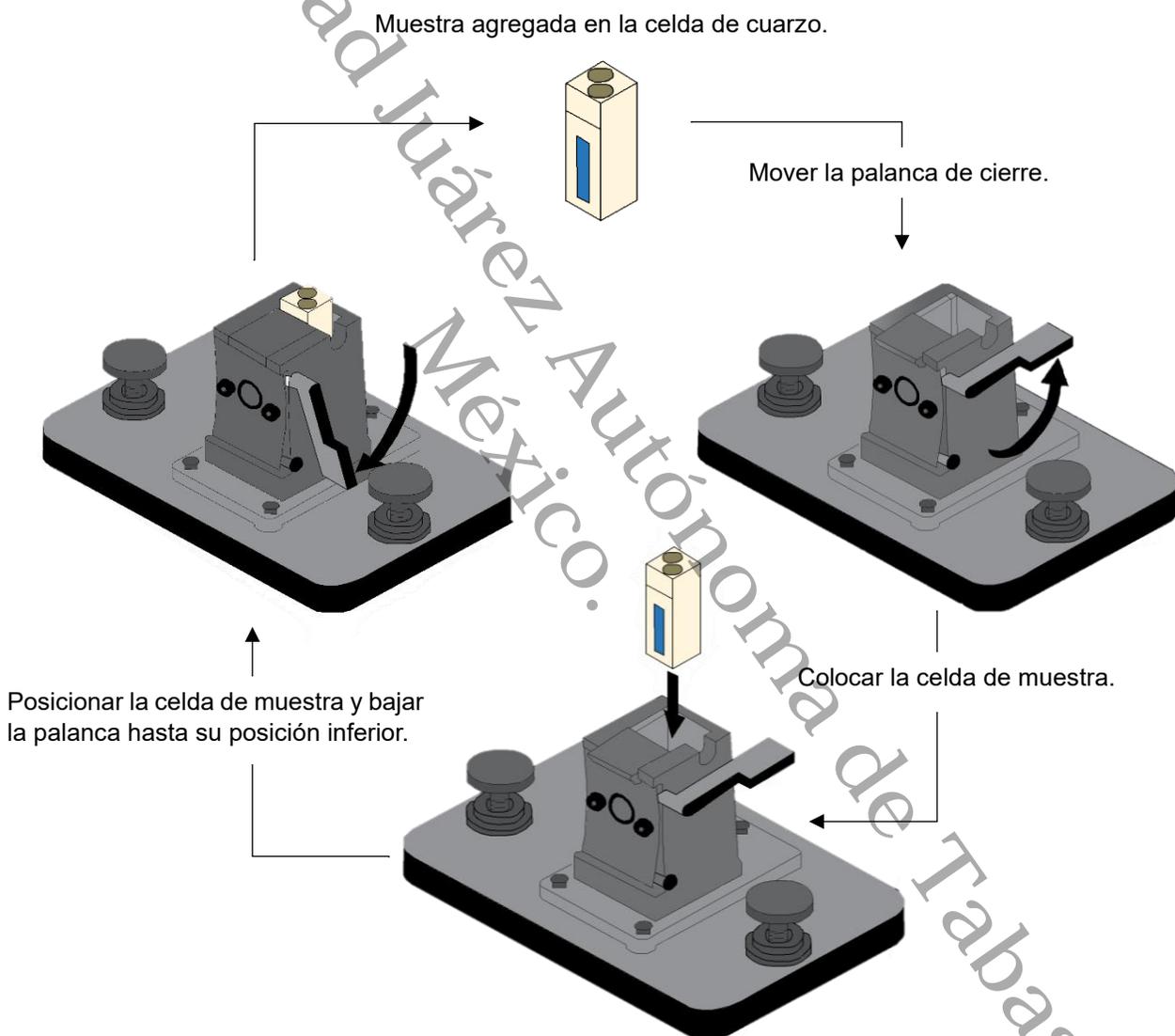
- Finalmente, se lavan todas las celdas para eliminar residuos, utilizando una secadora eléctrica y alcohol isopropílico para limpiar cuidadosamente cada uno de los viales empleados.

2.4.2. Resumen Procedimiento Análisis de adsorción de luz UV-Vis

La Figura 30 presenta un diagrama detallado que describe el procedimiento utilizado para el análisis de adsorción de luz UV-Vis, empleando el espectrofotómetro UV-Vis Agilent, modelo 8453.

Figura 30

Diagrama de metodología de análisis UV-Vis.



2.5 Metodología toxicidad aguda

Para este procedimiento se contó con el equipo **MICROBICS M 500 TOXITY ANALYZER** (Figura 31), ubicado en el laboratorio de remediación de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL), de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. (Ver Anexo 2)

Figura 31

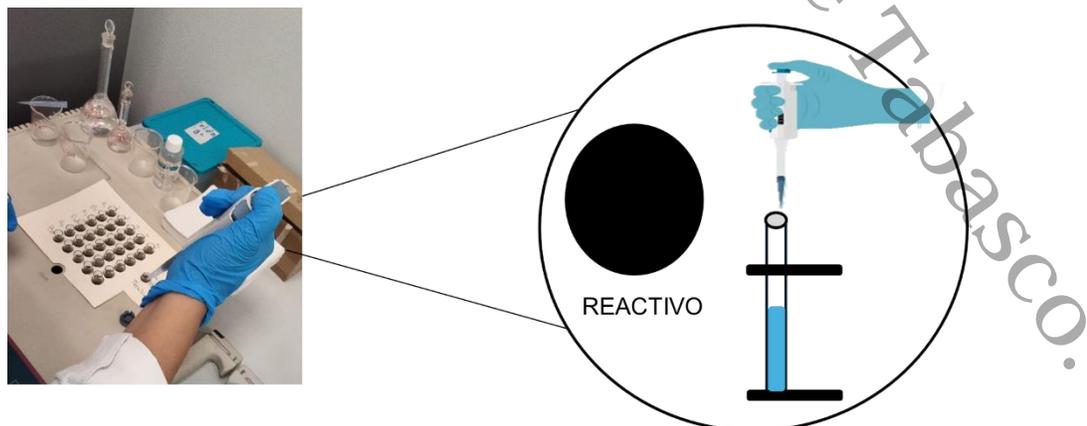
A) Equipo para medir toxicidad aguda Microbics M 500 y B) vista frontal.



Como primer paso, se introducen viales de vidrio en cada uno de los pozos. Posteriormente, se agregan $1250 \mu\text{L}$ de solución reconstituyente en el pozo del reactivo (ver Figura 32), dejándose reposar durante 10 minutos.

Figura 32

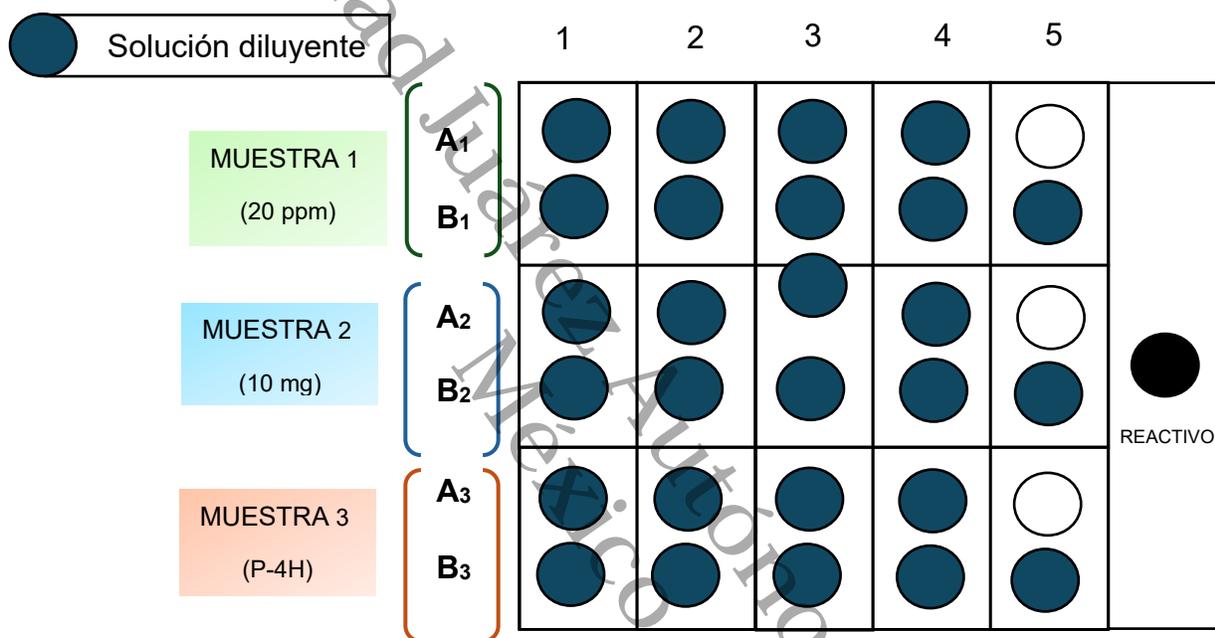
Inicio de la prueba de toxicidad (agregando $1250 \mu\text{L}$ de la solución reconstituyente).



Simultáneamente, se añaden 500 μL de solución diluyente en los pozos A₁ al A₄ y 500 μL en los pozos B₁ a B₅, como se muestra en la Figura 33. Es esencial asegurarse de que todas las muestras contengan la solución adecuada, ya que la falta de reactivo puede resultar en la pérdida de esta.

Figura 33

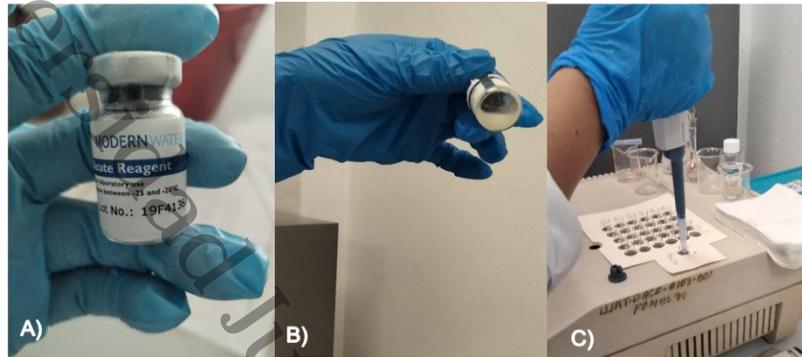
Esquema de la solución diluyente en los pozos A₁ a A₄, y 500 μL en los pozos B₁ a B₅.



Después de los primeros 10 minutos, cada pozo se mantiene a una temperatura de 15 °C. Continuamente, se prepara el reactivo de prueba incorporando los 1250 μL de solución reconstituyente del pozo de reactivo (ver Anexo 3) y agitándolo bien. Luego, esta mezcla se añade nuevamente al pozo de reactivo, proporcionando lo suficiente para 20 muestras (Figura 34) y dejándola reposar durante 10 minutos.

Figura 34

A) Bacteria bioluminiscente *Vibrio Fischeri*, B) se agrega solución reconstituyente y C) se deposita la bacteria en el pozo de reactivo.



Como siguiente paso, se agregan 250 μ L de solución osmótica previamente agitada (22% de cloruro de sodio) en el pozo A₅, el cual se encuentra vacío.

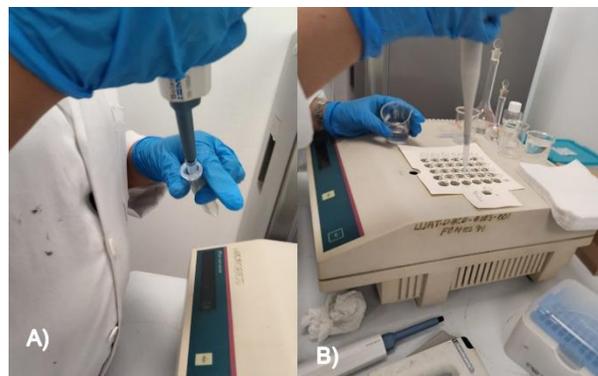
Para los siguientes pasos, se utilizan las siguientes muestras:

1. Muestra contaminada de 20 ppm de aspirina caducada en julio de 2023 (20 ppm).
2. Muestra de adsorción de aspirina con 10 mg de TiO_2 comercial (10 mg).
3. Muestra de adsorción de placa anodizada en 4 horas (P-4h).

Se incorporan 2500 μ L de la muestra (20 ppm) en el pozo A₅ (preferiblemente de forma manual, ya que esta celda estará casi llena) y se repite el mismo procedimiento para las siguientes dos muestras (10 mg y P-4h), cada una en su respectivo pozo a analizar, mezclándolas con la solución osmótica (Figura 35).

Figura 35

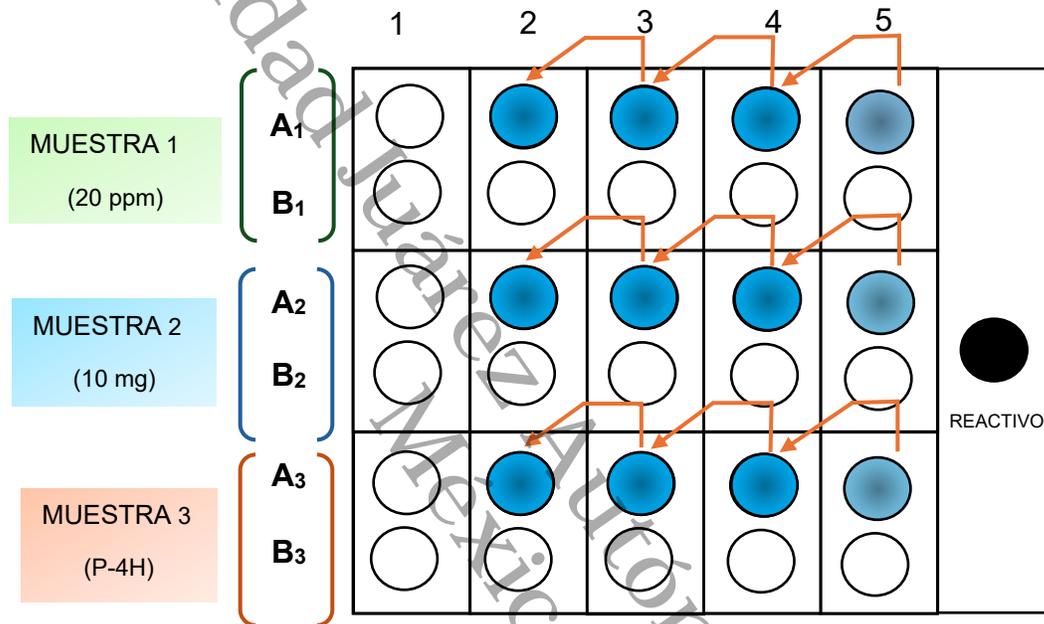
A) Muestra de 20 ppm y B) mezcla homogénea preparada con la solución osmótica.



Posteriormente, se extraen 1000 μ L del pozo A₅ y se depositan en el pozo A₄, mezclándolos bien. Este proceso se repite de A₄ a A₃ y luego de A₃ a A₂, como se muestra en la figura 36.

Figura 36

Esquema representativo para extraer 1000 μ L del pozo A₅ y depositarlos en el pozo A₄.



Dado que el pozo A₁ contiene únicamente solución diluyente, éste se convierte en el blanco. Una vez identificado, se introducen 10 μ L de reactivo microbiano en cada pozo B (desde B₁ hasta B₅), dejando que el reactivo escurra por las paredes del vial. Luego, se mezclan y se dejan reposar durante 10 minutos.

Tras añadir el reactivo, se mezclan las muestras utilizando el equipo vortex MaxiMix II de Thermo Scientific, modelo M37615 (ver figura 37).

Figura 37

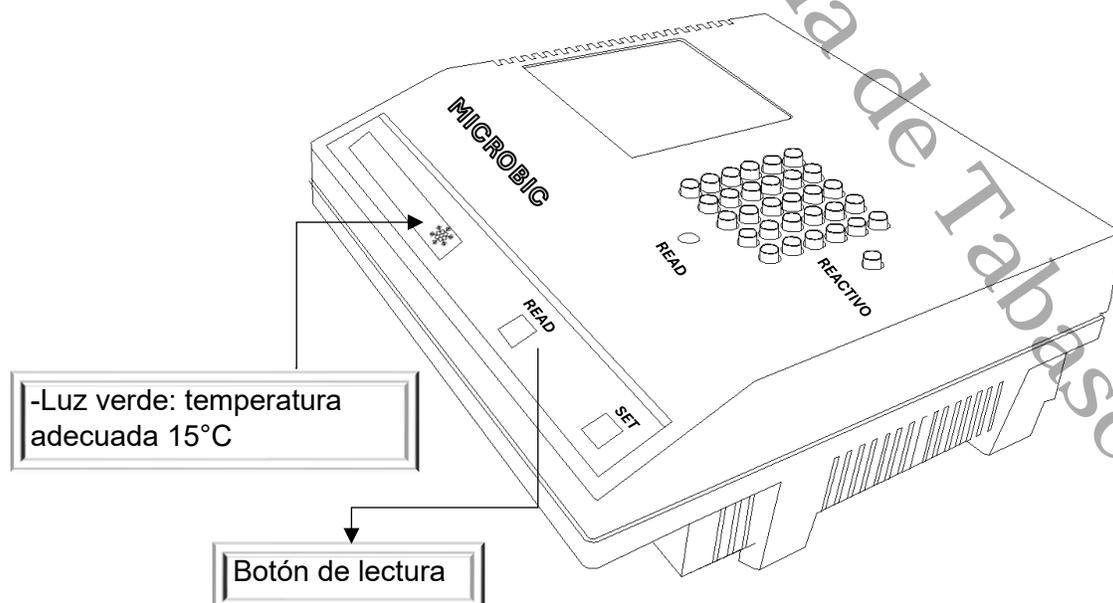
A) Se agrega 10 μ L de reactivo microbiano a cada pozo B y B) equipo vortex maxiMix II de thermo scientific, modelo M37615.



Al concluir los 10 minutos, se toman las primeras 5 lecturas de los pozos B₁ a B₅ previamente agitados. Continuamente, se colocan uno por uno en el pozo READ, dejándolos reposar durante 10 minutos (ver Figura 38). Estas lecturas se consideran las referencias de bioluminiscencia de la bacteria antes de exponerla a las muestras, recordando que la última lectura siempre corresponde al blanco.

Figura 38

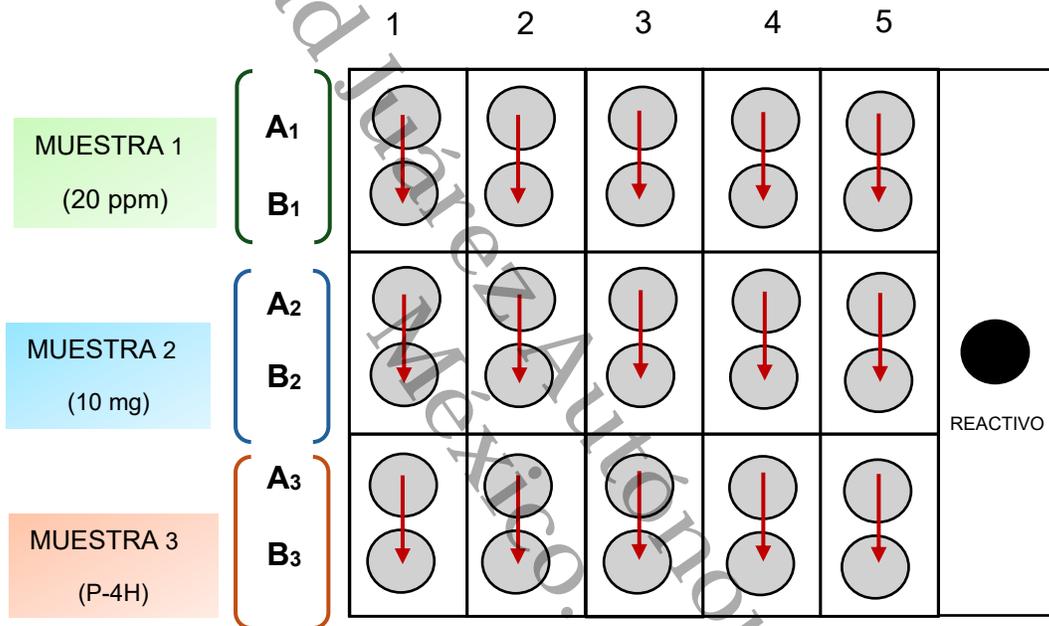
Representación de los botones de lectura del equipo Microbics M 500 Toxity Analyzer.



Después de 10 minutos, se añaden 500 μ L de A₁ a B₁, se mezclan y se repite el proceso de A₂ a B₂, y así sucesivamente. Se dejan reposar durante 5 minutos, y luego se realiza la lectura 2 de B₁ a B₅ para finalizar el análisis (ver Figura 39).

Figura 39

Esquema representativo para la lectura 2 que indica la adición de 500 μ L de A₁ a B₁, donde la bacteria está en contacto con la muestra.

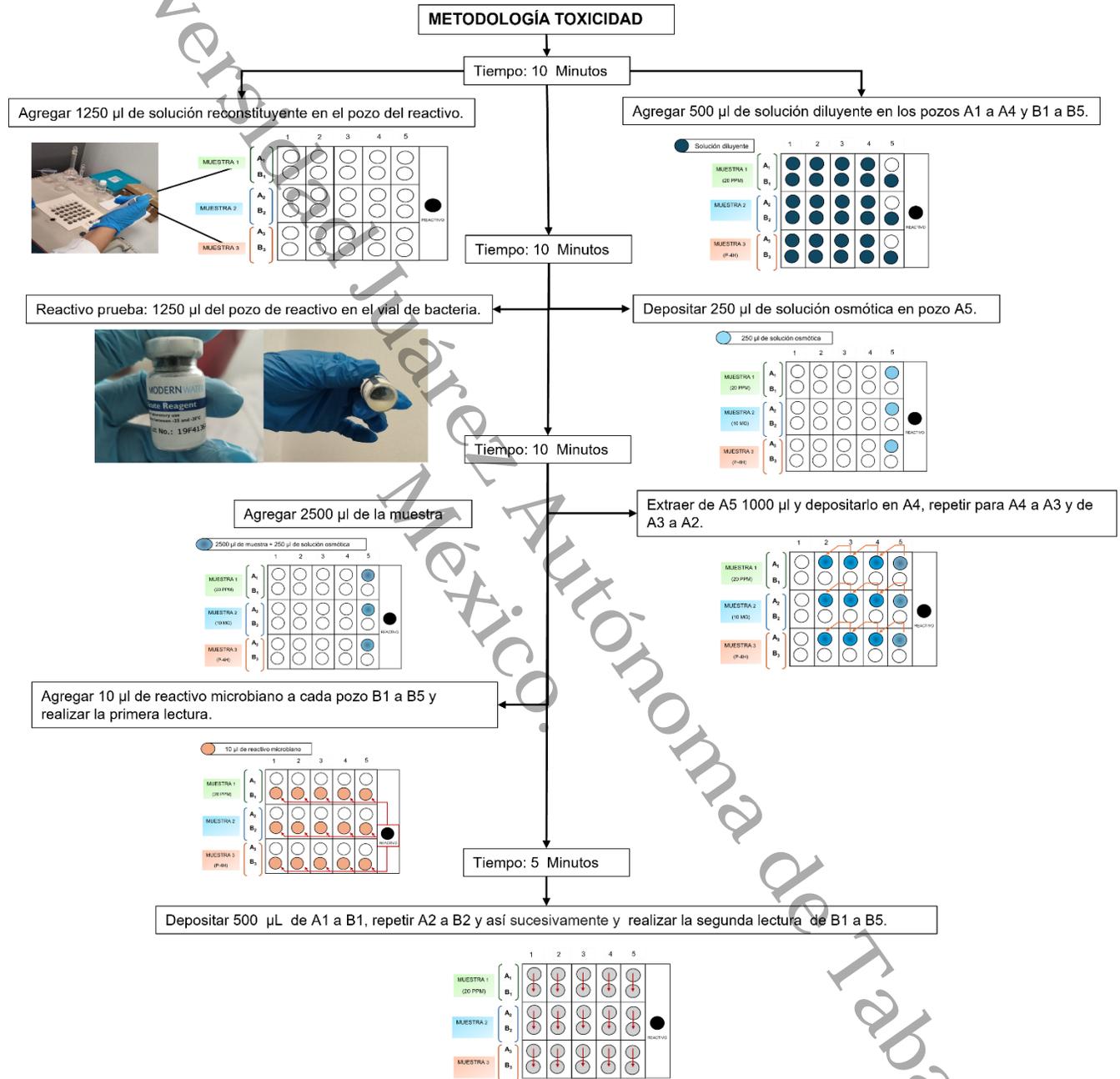


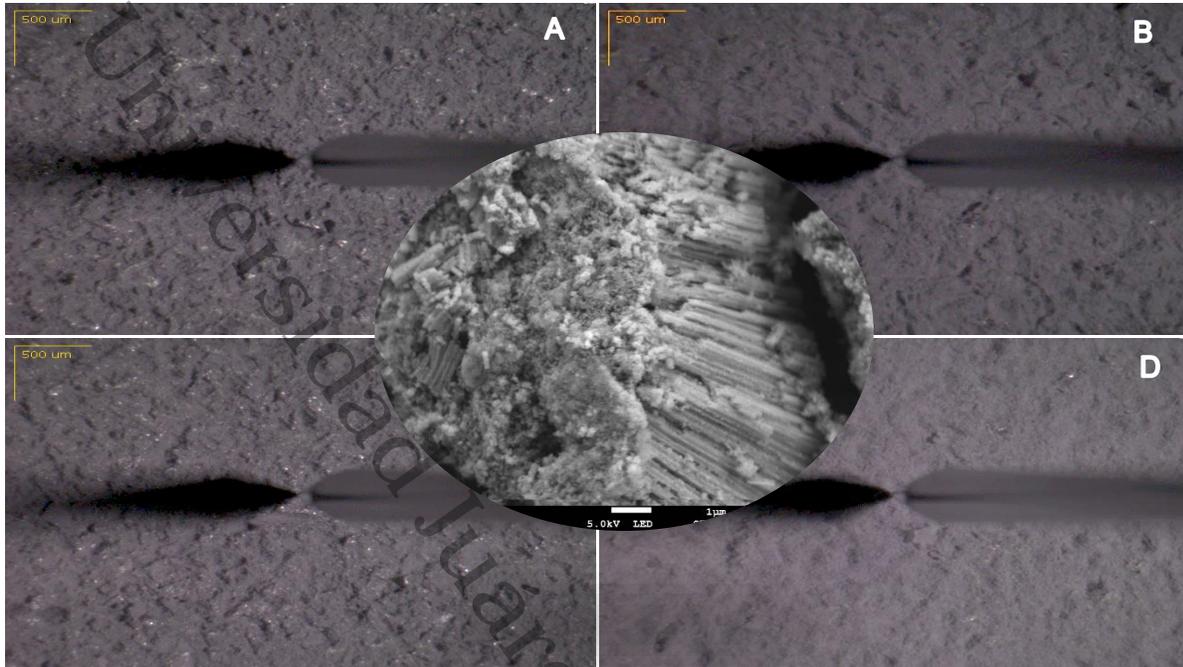
2.5.1 Resumen Procedimiento Análisis de absorción de luz UV-Vis

La Figura 40 muestra un diagrama detallado que explica el procedimiento empleado para realizar el análisis de toxicidad utilizando el equipo Microbics M 500 Toxity Analyzer.

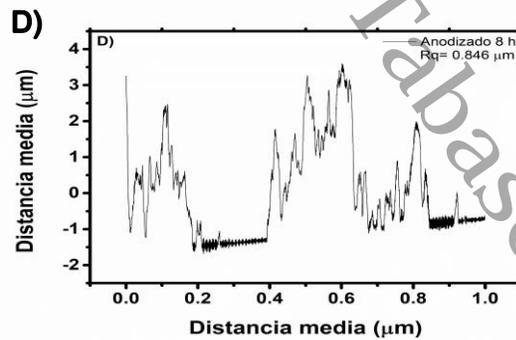
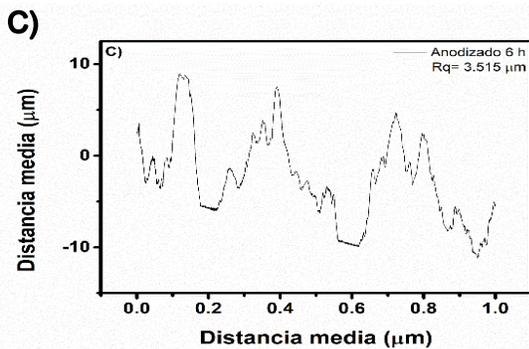
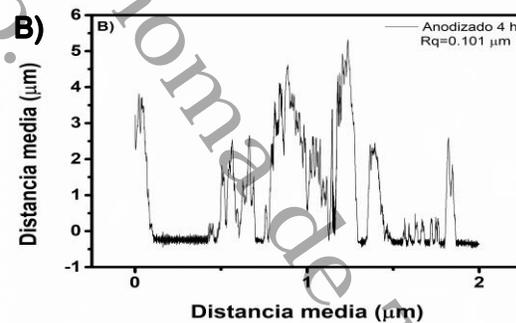
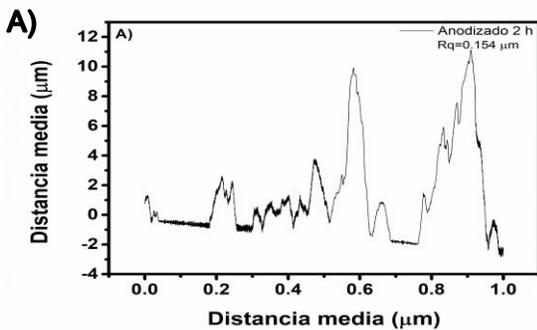
Figura 40

Diagrama de metodología de toxicidad.





CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIONES

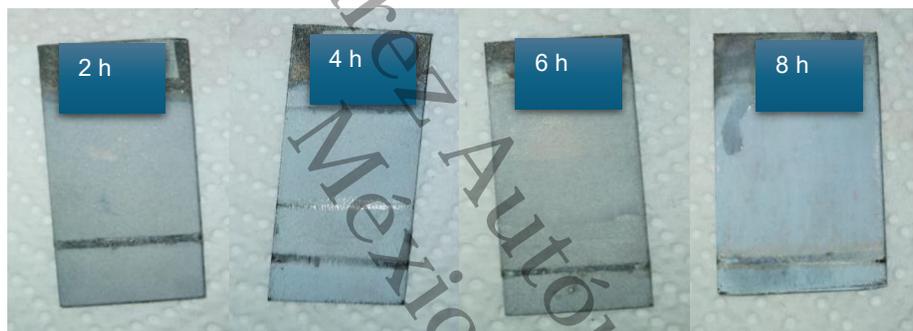


3.1 Anodizado de placas de titanio

Para el desarrollo del anodizado se tomaron 4 placas de titanio, las cuales contaban con un proceso de sandblasting previo, cada una de las muestras metálicas fueron sumergidas a una solución orgánica, donde se les inducía una corriente eléctrica de hasta 60 V, por diferentes tiempos 2 h, 4 h, 6 h y 8 h (ver Figura 41), estas mismas, fueron sometidas a un baño de alcohol y agua para eliminar el exceso de la solución orgánica a las cuales fueron expuestas, para posteriormente ser sumergidas en agua desionizada por 96 h.

Figura 41

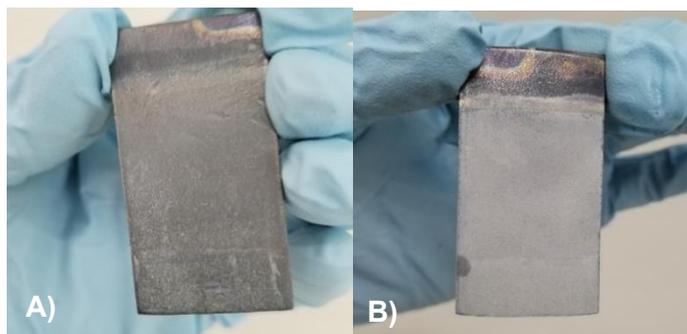
Placas de Ti anodizadas a diferentes tiempos, 2h, 4h, 6h y 8h.



Al transcurrir el tiempo establecido, las placas de titanio presentaron en la zona expuesta una evidente capa de óxido en su superficie, la cual se puede apreciar por el cambio de coloración, que dió como resultado un aspecto blanco, característico del TiO_2 , de igual forma, esta capa fue más notoria conforme se avanzó en las fases de obtención de la capa en la superficie laminar (Figura 42).

Figura 42

A) Placas de titanio en su estado inicial y B) después del proceso de anodizado.



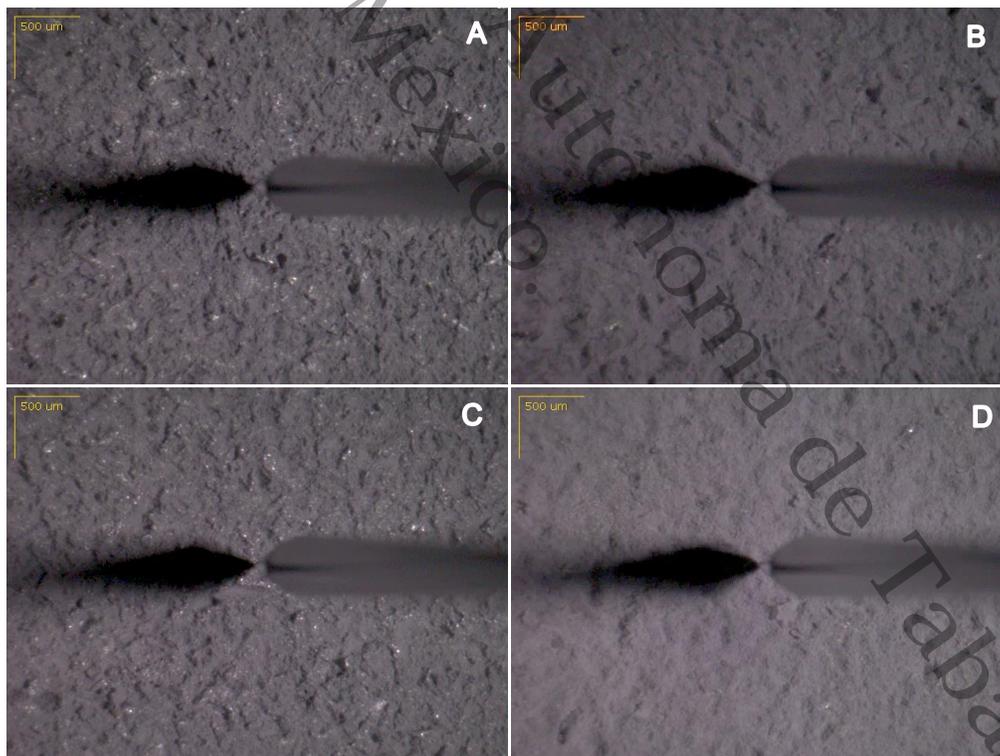
3.2 Perfilometría

En esta prueba se analizó el perfil de las placas anodizadas con el objetivo de conocer la uniformidad del crecimiento de la capa de dióxido de titanio sobre las superficies metálicas tratadas. En la Figura 43 se puede observar, a escala nanométrica, el desarrollo de partículas de TiO_2 sobre el área expuesta al baño de la solución orgánica.

En la Figura 43, las imágenes A) y C), correspondientes a las placas de 2 y 6 h de tratamiento respectivamente, muestran una capa de óxido poco uniforme, ya que en ambas se distinguen algunos espacios donde no ocurrió la adherencia de la capa de óxido. Sin embargo, en las placas de 4 y 8 h de tratamiento se aprecia un crecimiento más homogéneo en comparación con las láminas de titanio anteriormente mencionadas.

Figura 43

Superficie de la placa anodizada de titanio en diferentes tiempos A) 2h, B) 4h, C) 6h y



Los análisis cuantitativos arrojados por el perfilómetro se muestran en la Figura 44. A)-D), donde se presenta el perfil de las superficies junto con su respectivo factor de rugosidad (Rq), el cual corresponde a un promedio de 5 mediciones en diferentes zonas de cada una de las placas previamente obtenidas (Tabla 7).

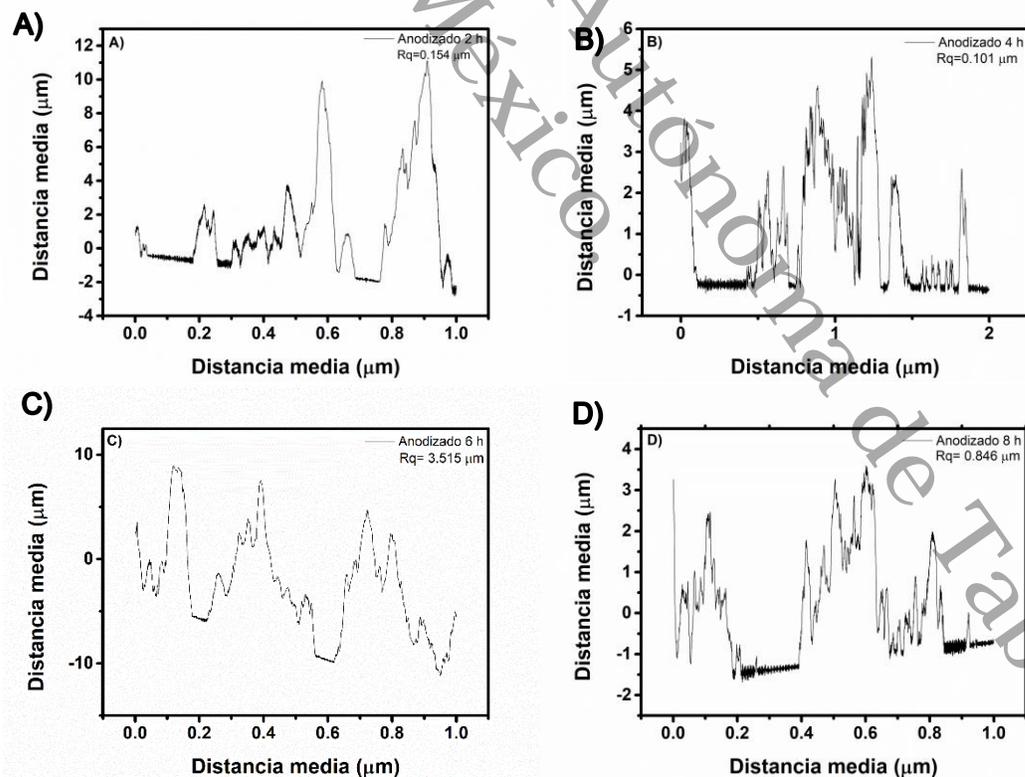
Tabla 7

Valores de rugosidad de las muestras anodizadas.

Tiempo de tratamiento de las muestras (h)	Rq promedio (μm)
2	0.154
4	0.101
6	3.515
8	0.846

Figura 44

Perfil de las superficies de Ti anodizado a A) 2h, B) 4h, C) 6h y D) 8h.



Nota: Se muestran los factores de rugosidad, los cuales son 0.154 μm, 0.101 μm, 3.515 nm y 0.846 μm, respectivamente.

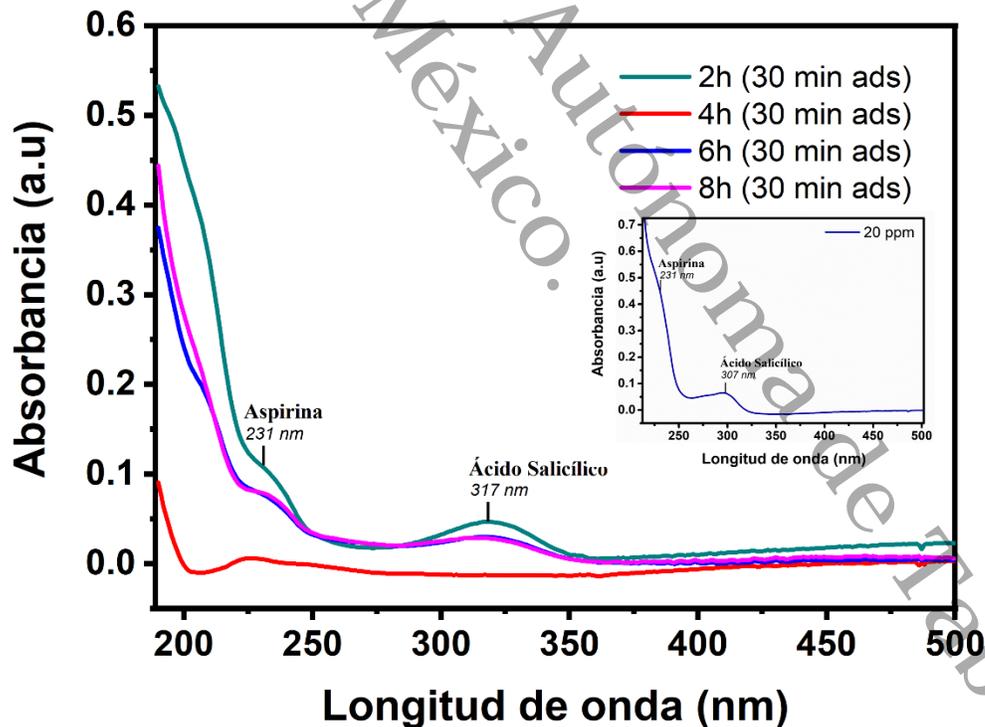
Como se observa en la Figura 44, se concluye preliminarmente que una disminución en el factor de rugosidad implica una mayor uniformidad, en este sentido, la muestra con mayor homogeneidad superficial es la placa de titanio anodizada durante 4 horas, del mismo modo, se advierte que la placa con mayor irregularidad superficial y el factor de rugosidad más alto es la placa sometida durante 6 horas.

3.3 Cuantificación por UV-Vis

Se analizaron las muestras obtenidas mediante adsorción (ads) de UV-Vis, estos resultados se muestran en la Figura 45, en la cual se observa un inserto, que pertenece al espectro de absorción de UV-Vis de la molécula modelo a 20 ppm, además, se muestra la adsorción de las placas de titanio anodizada.

Figura 45

Espectro de absorción de UV-Vis en una muestra de aspirina a 20 ppm.



Nota: Para la muestra de titanio anodizado a 2h, 4h, 6h y 8 h en una muestra de aspirina a 20 ppm. El inserto muestra el espectro de absorbancia de aspirina.



Después de 30 min, es posible observar dos picos principales, la aspirina (231 nm) y el ácido salicílico (317 nm), este último metabolito principal, además, se puede notar que la banda de absorción que representa la placa de 4 h está relativamente cerca de cero. En la Tabla 8, se presentan los porcentajes de degradación de la molécula modelo, obtenidos a través de una curva de calibración presentada en el Anexo 3.

Tabla 8

Porcentajes de degradación de aspirinas de las placas anodizadas.

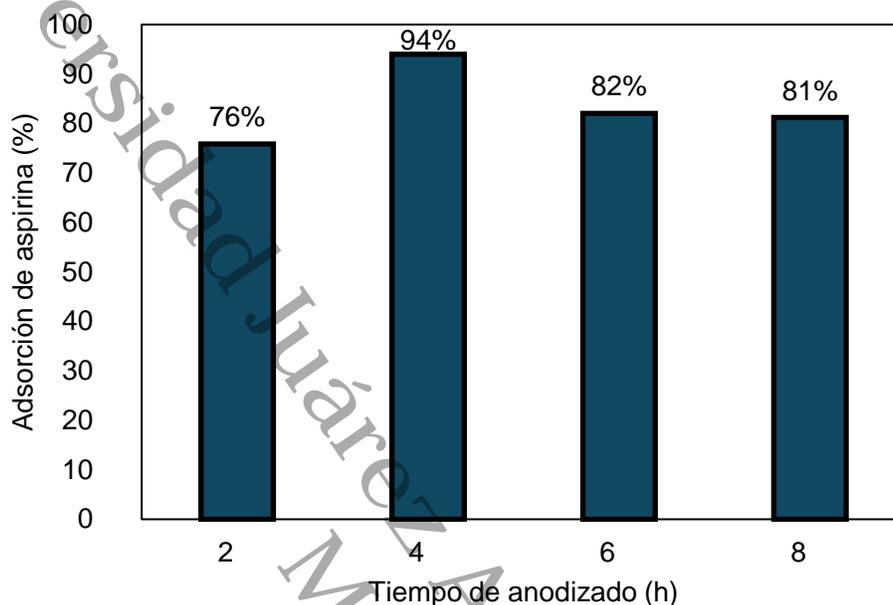
Tiempo de tratamiento de las muestras (h)	% Adsorción de aspirina
2	76%
4	94%
6	82%
8	81%

La Figura 46 representa la comparación de los porcentajes de adsorción de la molécula de aspirina, donde podemos observar que, en cada una de las placas analizadas, existe una disminución del medicamento dentro de la solución acuosa, donde pone en evidencia que la mayor adsorción se da en la placa de 4 h, superando por más de un 10% a las demás laminas estudiadas con un 94% de disminución en la presencia de aspirina en la muestra de 20 ppm inicial.

Por lo anterior, se asocia con los resultados expuestos en la Tabla 7, donde se muestra una capa uniforme de óxido obtenida en la placa tratada durante 4 hora, dando por hecho que al tener un Rq más bajo, los nanotubos formados en su superficie son más estables para una mayor adsorción de la molécula.

Figura 46

Gráfica de porcentajes de adsorción de aspirina utilizando placas anodizadas en periodos de 2, 4, 6 y 8 h.



La Figura 47, representa una serie de 3 repeticiones de una misma placa anodizada por 4 h sumergida en una solución acuosa de 20 ppm de aspirina. Los espectros de absorción de las dos primeras réplicas debajo de la solución contaminada con aspirina a 20 ppm, donde se presenta una ligera diferencia en cuanto a la adsorción de ácido acetilsalicílico de una repetición a otra.

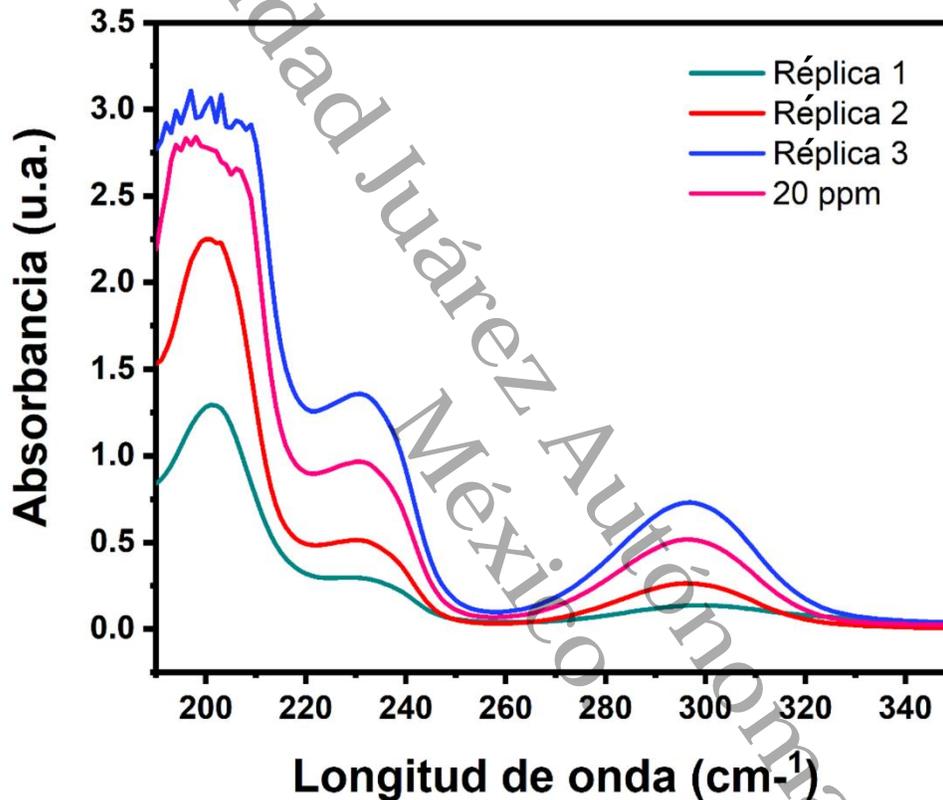
En la primera réplica se alcanzó una disminución significativa del contaminante agregado a la solución acuosa, similar al presentado en la Figura 45, no obstante, en la tercera aplicación del proceso, se observa que el espectro de absorción está por encima de la línea que representa la muestra original, lo que indicaría un aumento de aspirina en la solución.

Dicho lo anterior y teniendo en cuenta que es la misma placa de titanio anodizada en las tres réplicas, esto ocurre debido a que por cada réplica se utilizó una solución diferente de 20 ppm de la molécula modelo, por lo que el incremento de la banda a 231 nm, característica de la aspirina, se debe a la absorción de esta en la superficie de las placas con nanotubos de TiO_2 . Así mismo, el aumento de presencia de aspirina en la

última réplica se debió a una saturación de esta en los nanotubos adheridos sobre la placa.

Figura 47

Espectro de absorción UV-Vis para una sola muestra de titanio anodizado de 4h en tres diferentes soluciones de aspirina a 20 ppm.

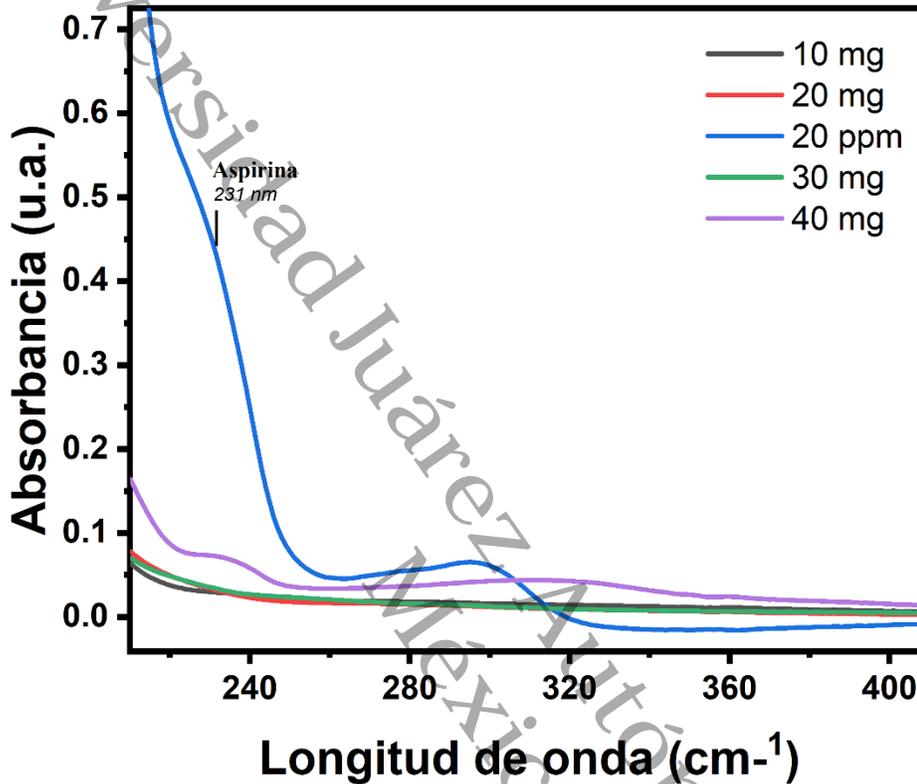


Por último, se hizo una comparativa de absorción del TiO_2 obtenido como nanotubos sobre placas de titanio con el óxido comercial, cuyos resultados se representan gráficamente en la Figura 48.

El gráfico muestra una disminución en la presencia de ácido acetilsalicílico similar a la mostrada previamente por la placa anodizada de 4 h, sin embargo, existe un desfase en rojo al querer incrementar la cantidad de TiO_2 a 40 mg en el agua tratada, por lo que se deduce que en área de 76 mm² de nanotubos obtenidos por un periodo de 4 h de anodizado, se concentran una cantidad aproximada de 10 a 30 mg de dióxido de titanio.

Figura 48

Espectro de absorción de dióxido de titanio (TiO_2) comercial en soluciones a 20 ppm de aspirina.



Nordin et al. (2020) destacan que la eliminación de ácido acetilsalicílico en aguas residuales es esencial debido a su uso generalizado como antiinflamatorio y los problemas que genera su persistencia en los ecosistemas acuáticos. Este contaminante no puede ser eliminado mediante métodos convencionales, por lo que la adsorción con carbón activado (CA) se presenta como una solución efectiva, demostrando buenos resultados en la remoción de contaminantes.

Los autores señalan que no existen estudios previos que exploren el uso de adsorbentes magnéticos simples, como el quitosano reticulado, para tratar AAS. En su investigación, proponen y sintetizan este material como una alternativa para tratar aguas contaminadas. Además, mediante espectrofotometría UV-Vis, identificaron un pico de absorbancia característico a 226 nm en sus experimentos de adsorción. Este dato es significativo, ya que sirve como referencia para estudios comparativos en esta área,



incluyendo valores cercanos como los 231 nm obtenidos en nuestros análisis, fortaleciendo la validez de sus métodos experimentales.

Hoppen et al. (2019) utilizan el carbón activado obtenido del mesocarpio de coco babasú como un adsorbente alternativo para la adsorción y desorción de ácido acetilsalicílico en soluciones acuosas. Su estructura microporosa y la abundancia de grupos carboxílicos y fenólicos en su superficie favorecen una adsorción eficiente mediante enlaces físicos, lo que permite la reversibilidad del proceso.

Este subproducto ha mostrado un alto potencial para eliminar contaminantes como tintes y cafeína de aguas residuales industriales. A pesar de que el carbón activado se utiliza ampliamente debido a sus propiedades texturales y químicas, son escasos los estudios que analizan la desorción y la reutilización de estos materiales. Por esta razón, al aplicar los principios de la economía circular con láminas de Ti, es posible realizar hasta tres ciclos de adsorción antes de reutilizarlas, maximizando su uso.

El proceso de adsorción se compone de tres etapas: una fase inicial de alta velocidad debido a la disponibilidad de sitios activos, una fase intermedia con disminución progresiva de la velocidad a medida que los sitios se saturan, y una fase final de equilibrio en la que los poros se encuentran completamente ocupados, entender estas etapas es crucial para desarrollar soluciones más sostenibles y eficaces en el tratamiento de aguas y en la reutilización de adsorbentes.

3.4 Prueba de toxicidad *Vibrio-Fischeri*

Esta prueba consta de la determinación de toxicidad de soluciones acuosas, por medio de la medición de la luminiscencia de la bacteria *Vibrio Fischeri*, por lo cual, al disminuir la luminiscencia expresa una carga de toxicidad de una muestra problema.

Dicho lo anterior, el análisis fue llevado a cabo a través del instrumento de pruebas toxicológicas de agua MICROBICS M 500 TOXITY ANALYZER (Figura 49), para ello se implementaron 3 muestras, las cuales constan de tres soluciones a 20 ppm de aspirina, dos de éstas tratadas por 10 mg de dióxido de Titanio comercial y por los nanotubos obtenidos en las placas de titanio.

Figura 49

Equipo de análisis toxicológico Microbics M500.



Cabe mencionar que las muestras estudiadas, no excedían un tiempo de 24 horas, además que, durante su transporte y manejo, se mantuvieron a una temperatura controlada de 3 a 10°C, preferiblemente sin suspensión para evitar interferencias en la lectura (Figura 50). Los resultados arrojados por el Microbics M500 de muestran en la Tabla 9.

Figura 50

Muestras para el análisis *Vibrio Fischeri* (20 ppm, 10 mg y P-4H).



La Tabla 9 muestra los valores de luminiscencia en unidades arbitrarias (u.a) registrados durante el análisis para cada una de las tres muestras. La lectura 1 corresponde a la luz emitida por la bacteria como control, mientras que la lectura 2 representa la luminiscencia emitida por la misma bacteria expuesta a muestras de 20 ppm de aspirina. Estas dos lecturas se realizaron para cada una de las muestras (20 ppm, 10 mg de dióxido de titanio comercial y la placa de 4h de anodizado)

Tabla 9

Muestras de 20 ppm (A), 10 mg de TiO_2 y (B) placa de 4 horas (C).

MUESTRA DE 20 ppm (A)		MUESTRA DE 10 mg (B)		MUESTRA DE PLACA DE 4h (C)	
Lectura 1	Lectura 2	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 1	Lectura 2
90	70	89	36	126	59
99	46	102	57	99	57
100	59	63	37	96	69
99	69	107	67	100	91
97	59	99	95	93	81



En la Tabla 10 se muestran los resultados finales de la prueba de toxicidad aguda, los cuales fueron obtenidos siguiendo la Norma Mexicana NMX-AA-112-SCFI-2017, con base en lo anterior, se determinó que existe una disminución significativa en cuanto a las unidades de toxicidad (UT) en comparación con la solución contaminada con 20 ppm, con unas UT de 26.83, mientras que, la muestra tratada por la placa de 4 h disminuyó a 21.10 UT, además que la última muestra tratada por 10 mg de TiO_2 comercial tuvo un aumento notable en comparación de las anteriores soluciones, por lo que, dedujimos que el uso de NT de dióxido de titanio se obtiene una disminución en la toxicidad del agua.

Tabla 10

Resultados de toxicidad aguda obtenidos por la prueba Vibrio Fischeri.

Muestra	Unidades de Toxicidad (UT)
20 ppm	26.83
10 mg	29.25
P-4h	21.10

Estos resultados pueden ser comparados con otros reportados en la literatura como Foti Luca (2022), el cual explica el uso del ensayo de bioluminiscencia en *Vibrio fischeri* para medir la toxicidad de aguas residuales y analizar el impacto de tratamientos de oxidación avanzada en la degradación del levofloxacino, un antibiótico común.

Se compararon la fotólisis y la fotocatalisis, siendo la fotólisis más eficiente en tiempo. No obstante, la fotocatalisis con TiO_2 en tubos de borosilicato generó efectos negativos debido al desprendimiento de nanopartículas tóxicas. Ambos procesos presentaron una cinética de primer orden, pero los efluentes tratados mostraron un incremento significativo en la toxicidad, superando el 97% de inhibición de bioluminiscencia en confirmando el aumento de toxicidad.

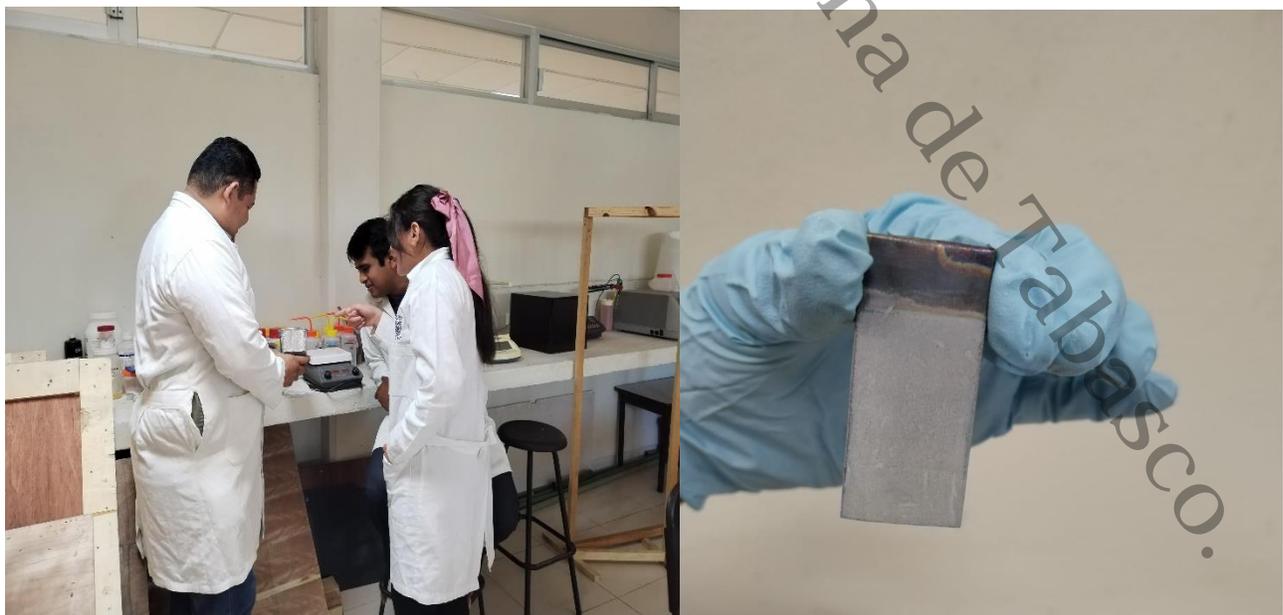


Srain et al. (2021) aborda las concentraciones letales de *Vibrio fischeri* tras una exposición de 15 minutos a carbamazepina, estos estudios buscan guiar futuras investigaciones sobre contaminantes emergentes en ambientes acuáticos y apoyar decisiones de gestión para reducir sus fuentes. Sin embargo, la falta de estudios comparativos en condiciones similares ha generado variaciones en los niveles de toxicidad reportados y un consenso limitado en la literatura científica.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES





El estudio realizado demuestra que el anodizado de Ti permite la obtención de nanotubos de NH_4TiOF_3 en una fase metaestable los cuales, con el tiempo, evolucionan a TiO_2 . Esta transformación genera nanoestructuras con propiedades de adsorción significativas, logrando una remoción de hasta un 94% de aspirina en solución. Este hallazgo subraya la eficacia de estas nanoestructuras para aplicaciones en la eliminación de compuestos específicos en medios acuosos, lo cual es prometedor para tratamientos de descontaminación de aguas.

La experimentación abarcó diferentes tiempos de anodizado, encontrando que una duración de 4 h proporciona la mayor uniformidad de las capas de TiO_2 formadas, como lo indica el factor de rugosidad, más bajo (0.101), determinado mediante perfilometría. La uniformidad superficial es crucial, ya que sugiere una estructura de nanotubos más controlada y homogénea, lo cual optimiza el área de adsorción y, por lo tanto, la capacidad de adsorción de contaminantes.

En correlación con los resultados de perfilometría, las pruebas de adsorción indicaron que la muestra anodizada a 4 h mostró la mayor eficiencia en la retención de aspirina. Esto sugiere que la uniformidad lograda en ese tiempo de anodizado optimiza las interacciones superficiales, permitiendo una mayor eficacia en la adsorción del contaminante en comparación con otros tiempos evaluados. Este comportamiento refuerza la importancia del control del tiempo de anodizado para maximizar el rendimiento de las propiedades funcionales del material.

La prueba de toxicidad, realizada mediante la técnica de *Vibro Fischeri*, comparó la efectividad de la muestra anodizada a 4 h con la de una muestra de TiO_2 comercial. Los resultados indicaron una reducción de cinco unidades de toxicidad en el tratamiento con los nanotubos, lo cual destaca que estos materiales no solo tienen buena capacidad de adsorción, sino que también son menos tóxicos que los óxidos de titanio comerciales. Este atributo es esencial para su aplicación en tratamientos que involucren contacto con organismos vivos o en ambientes sensibles.



Por último, el análisis demuestra que el proceso de anodizado de 4 h es óptimo para la creación de nanoestructuras de TiO_2 que combinan alta uniformidad, gran capacidad de adsorción y baja toxicidad. Estas características hacen que estos materiales tengan un alto potencial para aplicaciones en tratamientos de agua y en el tratamiento de contaminantes emergentes. Los resultados sugieren futuras investigaciones en la modificación del proceso de anodizado y la evaluación de otros compuestos para maximizar la efectividad en distintas aplicaciones ambientales.

- **Recomendaciones para futuras investigaciones:**

A lo largo de la metodología nos enfrentamos con diversos retos, que deben considerarse para optimizar futuros trabajos. Las siguientes recomendaciones están diseñadas para aumentar la precisión y la efectividad en esta área:

1. Duración de la solución orgánica: La solución orgánica no debe tener más de una semana desde su preparación, ya que es crucial conocer la cantidad de agua evaporada para mantener la concentración adecuada. En este caso, se realizó el monitoreo cada dos horas.

2. Evitar contaminación por corrosión: Es esencial que los caimanes utilizados no entren en contacto con la solución orgánica, ya que sus compuestos corrosivos pueden contaminar la muestra. Además, se debe verificar que los caimanes estén libres de corrosión antes de iniciar el proceso de anodizado. Además, el cátodo debe estar compuesto por un material resistente a la corrosión; por ello, es preferible utilizar un cátodo de titanio pulido, ya que esto favorece la adhesión de los nanotubos al ánodo.

3. Control del voltaje: Se debe monitorear constantemente el voltaje transferido a la solución, ya que ligeras variaciones pueden afectar la formación de los nanotubos.

4. Características del recipiente: El recipiente debe ser de plástico grueso, ya que los iones fluoruro pueden picar o degradar el vidrio, lo que puede debilitar las paredes del recipiente.

5. Sujeción adecuada de la placa: Para evitar movimientos o el contacto con las pinzas metálicas de tres dedos, que podrían provocar peladuras y contacto entre metales, se recomienda usar pinzas de plástico para asegurar un mejor agarre.



6. Análisis de adsorción: En este análisis, es fundamental emplear filtros específicos para cada medición, garantizando la precisión de los resultados.

7. Perfilometría: Antes de realizar el análisis de perfilometría, se sugiere realizar una rayadura en la placa para evaluar el grosor de la capa. Esto es preferible al uso de cinta, que puede no funcionar correctamente.

8. Pruebas de toxicidad: Este análisis requiere un mínimo de 23 muestras, ya que el reactivo bacteriano está calibrado para esa cantidad. Si se dispone de menos muestras, se sugiere combinar esfuerzos con otro proyecto para aprovechar los recursos disponibles.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



Referencias bibliográficas

- Albertin, K. F., Akashi, L., Challhua, R., Zúñiga, J., Rivera, M., Rondan, W., Cortiz, T. A., Longobardi, S., Barreto, L., & Champi, A. (2023). Low-cost synthesis of titanium dioxide nanotubes/reduced graphene oxide heterostructure for pH sensor applications. *Diamond and Related Materials*, 137, 110086. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110086>
- Ayorinde, T., & Sayes, C. M. (2023). An updated review of industrially relevant titanium dioxide and its environmental health effects. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 4, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2023.100085>
- Balamurugan, M., Silambarasan, M., Saravanan, S., & Soga, T. (2022). Synthesis of anatase and rutile mixed phase titanium dioxide nanoparticles using simple solution combustion method. *Physica B: Condensed Matter*, 638, 413843. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413843>
- Canedo, A., Saiki, P., Santos, A. L., Carneiro, K. da S., Souza, A. M. de, Qualhato, G., Brito, R. da S., Mello-Andrade, F., & Rocha, T. L. (2022). Zebrafish (*Danio rerio*) meets bioethics: the 10Rs ethical principles in research. *Ciência Animal Brasileira*, 23. <https://doi.org/10.1590/1809-6891v22e-70884>
- Cao, W., Chen, Z., Yang, M., Guan, H., Cheng, X., Zhang, M., Lin, F., Xiao, Y., Ling, M., Liang, C., & Chen, J. (2024). Construction of self-supported TiO_2 nanotube arrays with hybrid point defect engineering: A bifunctional anode for Li^+/Na^+ storage. *Acta Materialia*, 277, 120228. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120228>
- Cardona Gallo, S. A., Agudelo, E. A., Gaviria Restrepo, L. F., & Barrios Ziolo, L. F. (2018). Techniques to determine toxicity in industrial wastewater contaminated with dyes and pigments. *DYNA*, 85(207), 316–327. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.71915>
- Chacón, O. O., Cobas, V., & Reguera Ruiz, E. (2020). *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias Foro Sobre la Apropiación Social de Tecnologías para la Gestión Sostenible del Agua RED Temática CONACYT: Gestión de la Calidad y Disponibilidad del Agua Surface Engineering of Iron Oxide Nanostructures for the Removal of Water Contaminants*. <http://www.rlac.buap.mx>



- Chen, P., Wang, J., Xue, Y., Wang, C., Sun, W., Yu, J., & Guo, H. (2024). From challenge to opportunity: Revolutionizing the monitoring of emerging contaminants in water with advanced sensors. *Water Research*, 265, 122297. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122297>
- David, T. M., Dev, P. R., Wilson, P., Sagayaraj, P., & Mathews, T. (2022). A critical review on the variations in anodization parameters toward microstructural formation of TiO_2 nanotubes. *Electrochemical Science Advances*, 2(4). <https://doi.org/10.1002/elsa.202100083>
- Fang, Z., Huang, R., Chelme-Ayala, P., Shi, Q., Xu, C., & Gamal El-Din, M. (2019). Comparison of UV/Persulfate and UV/ H_2O_2 for the removal of naphthenic acids and acute toxicity towards *Vibrio fischeri* from petroleum production process water. *Science of The Total Environment*, 694, 133686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133686>
- Foti Luca. (2022). *Advanced Oxidation Processes (AOP): solutions for the degradation of emerging contaminants in liquid phases* (University of Basilicata, Ed.).
- Gaikwad, R. W., Sonawane, A. V., Hakke, V. S., Sonawane, S. H., Gaikwad, M. S., Lakhera, S. K., Babu G, V., Warade, A. R., Urgunde, A. B., & Sapkal, V. S. (2024). Application of apophyllite and thomsonite natural zeolite as modified adsorbents for the removal of zinc from acid mine drainage. *Chemosphere*, 350, 141095. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141095>
- Ge, S., Tian, W., Lou, Z., Wang, X., Zhuang, L.-L., & Zhang, J. (2024). Long-term toxicity assessment of antibiotics against *Vibrio fischeri*: Test method optimization and mixture toxicity prediction. *Journal of Hazardous Materials*, 469, 133933. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133933>
- Ghosh, M., Dey, P., Das, A., Giri, A., Nath, S., & Giri, S. (2024). Evaluation of arsenic induced genotoxicity and its impact on life processes of *Daphnia magna*. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 899, 503804. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503804>



- He, J., Chen, J., Liu, S., Lin, L., Zhang, Y., Xiao, S., & Cao, S. (2023). Activated carbon modified titanium dioxide/bismuth trioxide adsorbent: One-pot synthesis, high removal efficiency of organic pollutants, and good recyclability. *Journal of Colloid and Interface Science*, 648, 1034–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.05.206>
- Hoppen, M. I., Carvalho, K. Q., Ferreira, R. C., Passig, F. H., Pereira, I. C., Rizzo-Domingues, R. C. P., Lenzi, M. K., & Bottini, R. C. R. (2019). Adsorption and desorption of acetylsalicylic acid onto activated carbon of babassu coconut mesocarp. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102862. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102862>
- Huynh, N. C., Nguyen, T. T. T., Nguyen, D. T. C., & Tran, T. Van. (2023). Occurrence, toxicity, impact and removal of selected non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): A review. *Science of The Total Environment*, 898, 165317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165317>
- Hybiak, J., Broniarek, I., Kiryczyński, G., Los, Laura. D., Rosik, J., Machaj, F., Sławiński, H., Jankowska, K., & Urańska, E. (2020). Aspirin and its pleiotropic application. *European Journal of Pharmacology*, 866, 172762. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2019.172762>
- Islam, Md. A., Nazal, M. K., Akinpelu, A. A., Sajid, M., Alhussain, N. A., Billah, R. E. K., & Bahsis, L. (2024). Novel activated carbon derived from a sustainable and low-cost palm leaves biomass waste for tetracycline removal: Adsorbent preparation, adsorption mechanisms and real application. *Diamond and Related Materials*, 147, 111375. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111375>
- Ivanovskaya, M., Chernyakova, K., Ovodok, E., Poznyak, S., Kotsikau, D., & Azarko, I. (2022). Nature of paramagnetic defects in black titanium dioxide nanotubes. *Materials Chemistry and Physics*, 278, 125703. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125703>
- Kong, Q., Shi, X., Ma, W., Zhang, F., Yu, T., Zhao, F., Zhao, D., & Wei, C. (2021). Strategies to improve the adsorption properties of graphene-based adsorbent towards heavy metal ions and their compound pollutants: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125690. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125690>



- Li, F., Yue, S., Zhao, Z., Liu, K., Wang, P., & Zhan, S. (2024). Application of molecularly imprinted polymers in the water environmental field: A review on the detection and efficient removal of emerging contaminants. *Materials Today Sustainability*, 27, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100904>
- Li, X., Zhang, L., Yang, Z., Wang, P., Yan, Y., & Ran, J. (2020). Adsorption materials for volatile organic compounds (VOCs) and the key factors for VOCs adsorption process: A review. *Separation and Purification Technology*, 235, 116213. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116213>
- Liang, A., Wu, F., Li, C., Yu, Y., Dong, Z., Chen, G., Yu, F., Yuwen, Y., & Liu, D. (2022). Aspirin inhibits stem cell proliferation during freshwater *Dugesia japonica* regeneration by STAT3/SOX2/OCT4 signaling pathway. *Aquatic Toxicology*, 247, 106158. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106158>
- Lotfi, S., Ahmadi, S., & Kumar, P. (2022). Ecotoxicological prediction of organic chemicals toward *Pseudokirchneriella subcapitata* by Monte Carlo approach. *RSC Advances*, 12(38), 24988–24997. <https://doi.org/10.1039/D2RA03936B>
- Luo, X., Xu, T., Ngan, D. K., Xia, M., Zhao, J., Sakamuru, S., Simeonov, A., & Huang, R. (2024). Prediction of chemical-induced acute toxicity using in vitro assay data and chemical structure. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 117098. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2024.117098>
- Milenković, I., Radotić, K., Despotović, J., Lončarević, B., Lješević, M., Spasić, S. Z., Nikolić, A., & Beškoski, V. P. (2021). Toxicity investigation of CeO₂ nanoparticles coated with glucose and exopolysaccharides levan and pullulan on the bacterium *Vibrio fischeri* and aquatic organisms *Daphnia magna* and *Danio rerio*. *Aquatic Toxicology*, 236, 105867. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105867>
- Mu, R., Liu, B., Chen, X., Wang, N., & Yang, J. (2020). Hydrogel adsorbent in industrial wastewater treatment and ecological environment protection. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101107. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101107>



- Nordin, A. H., Abdul Samad, N., Paiman, S. H., Md Noor, S. F., Rushdan, A. I., & Ngadi, N. (2024). A mini review on aspirin removal by carbon/noncarbon-based adsorbents from aqueous solution. *Materials Today: Proceedings*, 96, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.373>
- Nordin, A. H., Ngadi, N., Othman, N. F. H., Razali, N. A., Nabgan, W., Alam, M. N. H. Z., Wong, S., & An, E. H. (2020). Adsorptive Removal of Acetylsalicylic Acid in Wastewater Onto Crosslinked-Chitosan. *Proceedings of the Third International Conference on Separation Technology 2020 (ICoST 2020)*. <https://doi.org/10.2991/aer.k.201229.019>
- Parolini, M. (2020a). Toxicity of the Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs) acetylsalicylic acid, paracetamol, diclofenac, ibuprofen and naproxen towards freshwater invertebrates: A review. *Science of The Total Environment*, 740, 140043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140043>
- Parolini, M. (2020b). Toxicity of the Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs) acetylsalicylic acid, paracetamol, diclofenac, ibuprofen and naproxen towards freshwater invertebrates: A review. *Science of The Total Environment*, 740, 140043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140043>
- Pellenz, L., de Oliveira, C. R. S., da Silva Júnior, A. H., da Silva, L. J. S., da Silva, L., Ulson de Souza, A. A., de Souza, S. M. de A. G. U., Borba, F. H., & da Silva, A. (2023). A comprehensive guide for characterization of adsorbent materials. *Separation and Purification Technology*, 305, 122435. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122435>
- Pica Granados, Y., & Lerdo de Tejada Brito, A. (2003). *Toxicity analysis in water* (Mexican Institute of Water Technology, Ed.; Vol. 1). 2003.
- Puga, M. L., Venturini, J., ten Caten, C. S., & Bergmann, C. P. (2022). Influencing parameters in the electrochemical anodization of TiO_2 nanotubes: Systematic review and meta-analysis. *Ceramics International*, 48(14), 19513–19526. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.059>
- Ramaripa, P. S., Modibane, K. D., Seleka, W. M., Somo, T. R., Makhado, E., Makgopa, K., & Ogunbayo, T. B. (2024). Recent applications of analytical techniques and electrochemical



- methods in characterizations of the titanium dioxide composites. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(1), 100444. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100444>
- Rathi, B. S., & Kumar, P. S. (2021). Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. *Environmental Pollution*, 280, 116995. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116995>
- Scrimieri, L., Velardi, L., Serra, A., Manno, D., Ferrari, F., Cantarella, M., & Calcagnile, L. (2020). Enhanced adsorption capacity of porous titanium dioxide nanoparticles synthesized in alkaline sol. *Applied Physics A*, 126(12), 926. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04103-2>
- Sivaprakash, V., & Narayanan, R. (2021). Synthesis of TiO_2 nanotubes via electrochemical anodization with different water content. *Materials Today: Proceedings*, 37, 142–146. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.657>
- Sobanska, M., Cesnaitis, R., Versonnen, B., & Nyman, A.-M. (2024). Toxicity testing, aquatic. In *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 323–330). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00015-4>
- Srain, H. S., Beazley, K. F., & Walker, T. R. (2021). Pharmaceuticals and personal care products and their sublethal and lethal effects in aquatic organisms. *Environmental Reviews*, 29(2), 142–181. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0054>
- Su, Y., Zhao, Q., Du, J., Liu, C., Jiang, X., Wei, W., & Tong, X. (2023). Pickering emulsion-enhanced *Vibrio fischeri* assay for ecotoxicity assessment of highly hydrophobic polycyclic aromatic hydrocarbons. *Chemosphere*, 313, 137470. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137470>
- Sudarsan, J. S., Dogra, K., Kumar, R., Raval, N. P., Leifels, M., Mukherjee, S., Trivedi, M. H., Jain, M. S., Zang, J., Barceló, D., Mahlknecht, J., & Kumar, M. (2024). Tricks and tracks of prevalence, occurrences, treatment technologies, and challenges of mixtures of emerging contaminants in the environment: With special emphasis on microplastic. *Journal of Contaminant Hydrology*, 265, 104389. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104389>



- Tischler, A. H., Vanek, M. E., Peterson, N., & Visick, K. L. (2021). Calcium-Responsive Diguanylate Cyclase CasA Drives Cellulose-Dependent Biofilm Formation and Inhibits Motility in *Vibrio fischeri*. *MBio*, 12(6). <https://doi.org/10.1128/mBio.02573-21>
- Torres, I. Z., de Jesús Pérez Bueno, J., Torres López, C. Y., Rojas, L. L., Mendoza López, M. L., & Vong, Y. M. (2016a). Nanotubes with anatase nanoparticulate walls obtained from NH_4TiOF_3 nanotubes prepared by anodizing Ti. *RSC Advances*, 6(47), 41637–41643. <https://doi.org/10.1039/C6RA05738A>
- Torres, I. Z., de Jesús Pérez Bueno, J., Torres López, C. Y., Rojas, L. L., Mendoza López, M. L., & Vong, Y. M. (2016b). Nanotubes with anatase nanoparticulate walls obtained from NH_4TiOF_3 nanotubes prepared by anodizing Ti. *RSC Advances*, 6(47), 41637–41643. <https://doi.org/10.1039/C6RA05738A>
- Yoo, J., & Lee, K. (2023). TiO_2 nanotubes fabricated by electrochemical anodization in molten $o\text{-}H_3PO_4$ -based electrolyte: Properties and applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 63, 101672. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2022.101672>
- Zakir, O., Idouhli, R., Elyaagoubi, M., Khadiri, M., Aityoub, A., Koumya, Y., Rafqah, S., Abouelfida, A., & Outzourhit, A. (2020). Fabrication of TiO_2 Nanotube by Electrochemical Anodization: Toward Photocatalytic Application. *Journal of Nanomaterials*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/4745726>



ANEXOS

Anexo 1

- Cálculos para Elaboración de solución orgánica

Ecuación

$$\rho = m/v \rightarrow \rho * v = m$$

Datos

$$\rho = 1.11 \frac{g}{mL} \quad H_2O = 7 g$$

Sustitución

$$m = \left(1.11 \frac{g}{mL}\right) (343 mL)$$

$$m = 380.73g + 7 g = 387.73 g$$

$$m = S(387.73 g)(0.003) = 1.16 g$$

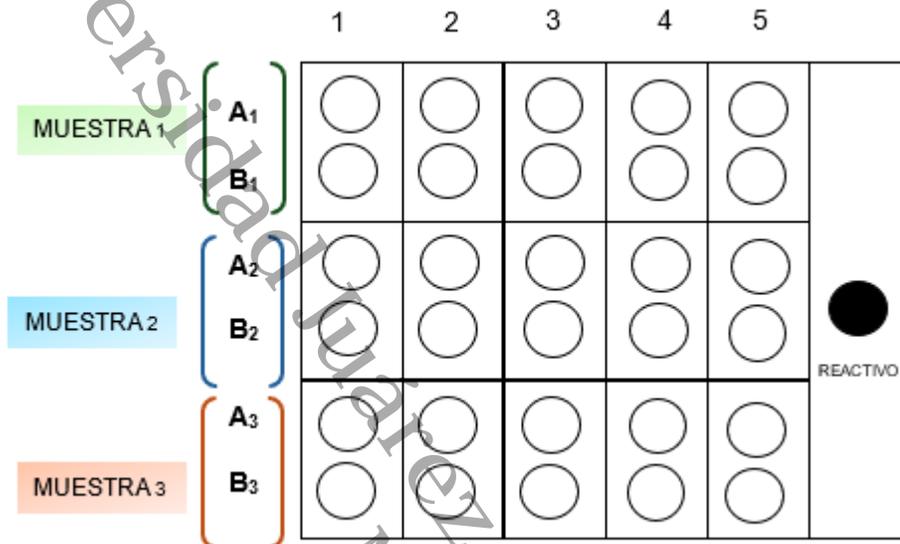
Anexo 2

Indicaciones previas a la experimentación

Antes de iniciar la operación del equipo, se nos informó que tiene la capacidad de analizar tres tipos de muestras, utilizando los pozos designados como A y B. Es importante destacar que los viales de lectura pertenecen al pozo B, por lo que deben estar libres de rayaduras. En la Figura 51 se muestra un esquema de las muestras.

Figura 51

Representación esquemática del orden de las muestras en los pozos dispuestos en 6 filas y 5 columna.



Anexo 3

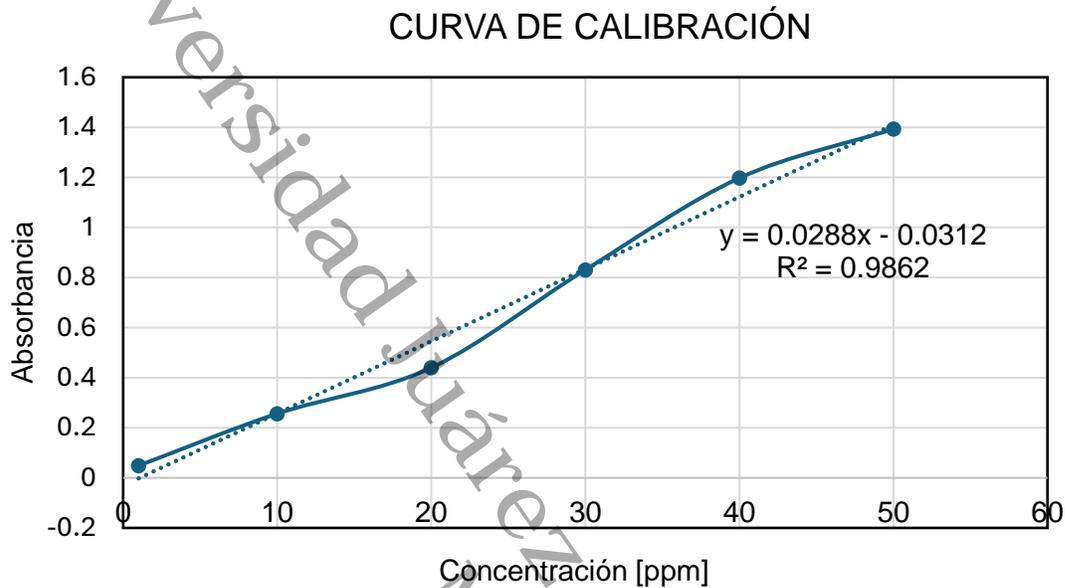
Curva de calibración

Tabla 11

Datos para la elaboración de la curva de calibración

Concentración (ppm)	Absorbancia
50	1.39297542
40	1.19743459
30	0.830804158
20	0.439728497
10	0.256411781
1	0.048652837

Gráfica de curva de calibración



Anexo 4

- Cálculo para obtención de la CE_{50}

$$Y = a + bx$$

a = Intersección u ordenada al origen

b = Pendiente

Si deseamos saber el valor de x cuando $y = 50$ ($CE_{50}\%$)

Sustituimos y $X = \text{anti-log}$

Anexo 5

Resumen de las condiciones recomendadas para análisis de toxicidad aguda utilizando la bacteria *Vibrio fischeri*, establecidos por el manual de IMTA (Pica Granados & Lerdo de Tejada Brito, 2003).



1. Tipo de ensayo: Estático
2. Temperatura: $15 \pm 2^\circ\text{C}$
3. Lector: Luminómetro de luz fluorescente
4. Intensidad luminosa por detectar: 490 nm
5. Volumen del recipiente: 3 mL
6. Volumen de la solución prueba: 1 mL
7. Densidad celular del inóculo / Celda: 10^6 Células / mL (10 μL de liofilizado)
8. Número de réplicas: No es necesario
9. Agua de dilución: Solución salina al 20%
10. Factor de dilución: 0.3 o 0.5
11. Efecto medido: Inhibición de la emisión luminosa CE_{50}
12. Resultados:
 - Control negativo: Emisión >90 unidades de emisión
 - Control positivo: CE_{50} dentro de los intervalos de confianza preestablecido para el toxico de referencia seleccionado (Fenol 13-26 mg/L)



Anexo 6

- Constancia de participación en el 3er Coloquio Nacional Tendencias en el Desarrollo de los Materiales: Hacia los procesos sostenibles

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA... ACCIÓN EN LA FE"

División Académica de Ingeniería y Arquitectura

MEB
Re d
Acadé m i c a
Materiales, Energía y Biotecnología

3^{er} Coloquio Nacional
Tendencias en el desarrollo de los materiales: Hacia los procesos sostenibles

**Otorga la presente
CONSTANCIA**

A: Eduardo Ávalos Zacarías, Ivette Guadalupe Rodríguez Rodríguez,
Edicson Macedonio López Alejandro e Ildelfonso Zamudio Torres

Por haber impartido la ponencia oral denominada "CRECIMIENTO DE UNA CAPA DE ÓXIDO DE TITANIO MEDIANTE ANODIZADO DE TI PARA LA ADSORCIÓN DE ASPIRINA". En el marco del 3er. Coloquio Nacional Tendencias en el Desarrollo de los Materiales: Hacia los procesos sostenibles, realizado los días 07 y 08 de septiembre del presente, a través de la plataforma del Aula Virtual MS TEAMS.

Cunduacán, Tabasco; a 08 de septiembre de 2023

DIRECCIÓN

Dra. Dora María Frías Márquez
DIRECTORA

Aula Virtual UJAT

Folio: CDCE/2023/2498



Anexo 7

- Constancia de participación en Latin X Chem



Anexo 8

- Constancia de participación y obtención del 3er lugar en “El Cuarto Foro El Edén De La Ciencia”.



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

SECRETARÍA
DE INVESTIGACIÓN,
POSGRADO Y
VINCULACIÓN

LEGADO
UJAT

Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Ivette Guadalupe Rodríguez Rodríguez y Eduardo Avalos Zacarías
Asesorados por el Dr. Ildelfonso Zamudio Torres

Por haber obtenido el Tercer lugar a nivel estatal en el área de conocimiento I. Físico-Matemáticas y Ciencias de la Tierra en el marco del Cuarto Foro el Edén de la Ciencia con el proyecto de investigación titulado: Nanotubos de TiO_2 como absorbedores de nuevos contaminantes emergentes en agua: caso aspirina, presentado el día 27 de octubre del 2023 a través del Aula Virtual-UJAT.


ID GANADORES-FEC-2023-0023


Dra. Karina Pérez Hernández
Directora de Investigación
SIPVU UJAT

Villahermosa, Tabasco a 27 de octubre de 2023.


"Secretaría de Investigación, Posgrado y Vinculación, Sistema de Gestión de Calidad, certificado por American Trust Register, S.C.", Alcance de Certificación (Véase en el Manual de Calidad), Número de certificado ATR 0742 en base a (número de referencia MM.XC.CC-0001-IMNC-2015), Vigencia de Certificación (11 de julio de 2026).

Anexo 9

- Constancia de participación y obtención del 1er lugar en la Feria Tabasqueña de Ciencia E Ingeniería de Tabasco 2024



Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

Título de la tesis:	Capacidad de adsorción de nanotubos de Ti/TiO ₂ sobre la molécula ácido acetilsalicílico (aspirina).
Autores de la tesis:	Eduardo Avalos Zacarias Ivette Guadalupe Rodríguez Rodríguez
ORCID:	0009-0008-2657-9256 0009-0000-2478-985X
Resumen de la tesis:	<p>Actualmente, se consideran contaminantes emergentes a un grupo de sustancias presentes en concentraciones diminutas, pero con un gran impacto ambiental debido a sus características tóxicas. Estos contaminantes provienen de diversas fuentes, principalmente de descargas de aguas residuales de instalaciones médicas, áreas urbanas e industriales. La eliminación inadecuada de medicamentos en desagües o inodoros contribuye significativamente a este problema, intensificado por la falta de conciencia pública sobre la correcta gestión de productos farmacéuticos en especial la aspirina.</p> <p>Diferentes estudios han demostrado que la adsorción es una alternativa eficaz para eliminarlas. Adsorbentes con alta porosidad y gran área superficial, como los nanotubos de TiO₂, son especialmente eficientes. La formación de estos nanotubos, utilizando HF y variando voltajes, mejora el crecimiento por oxidación. Durante el anodizado de titanio, se obtienen nanotubos de NH₄TiOF₃, esta fase es metaestable, por lo que, mediante un procedimiento de oxidación e hidrólisis, evolucionan a TiO₂, eliminando el flúor y estabilizando la estructura.</p> <p>Los sistemas de tratamiento convencionales pueden no ser eficaces para eliminar la aspirina, lo que aumenta el riesgo de exposición crónica para la biodiversidad acuática y la salud humana. Este estudio busca proponer una alternativa viable para reducir la presencia de este contaminante</p>

	<p>emergente a través de un material con alta capacidad de adsorción y por consecuencia, disminuir la toxicidad del agua contaminada por la aspirina.</p>
<p>Palabras clave de la tesis:</p>	<p><i>Contaminantes emergentes, nanotubos TiO₂, ácido acetilsalicílico y toxicidad.</i></p>
<p>Referencias citadas:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Albertin, K. F., Akashi, L., Challhua, R., Zúñiga, J., Rivera, M., Rondan, W., Cortiz, T. A., Longobardi, S., Barreto, L., & Champi, A. (2023). Low-cost synthesis of titanium dioxide nanotubes/reduced graphene oxide heterostructure for pH sensor applications. <i>Diamond and Related Materials</i>, 137, 110086. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110086 • Ayorinde, T., & Sayes, C. M. (2023). An updated review of industrially relevant titanium dioxide and its environmental health effects. <i>Journal of Hazardous Materials Letters</i>, 4, 100085. https://doi.org/10.1016/j.hazl.2023.100085 • Balamurugan, M., Silambarasan, M., Saravanan, S., & Soga, T. (2022). Synthesis of anatase and rutile mixed phase titanium dioxide nanoparticles using simple solution combustion method. <i>Physica B: Condensed Matter</i>, 638, 413843. https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413843 • Canedo, A., Saiki, P., Santos, A. L., Carneiro, K. da S., Souza, A. M. de, Qualhato, G., Brito, R. da S., Mello-Andrade, F., & Rocha, T. L. (2022). Zebrafish (Danio rerio) meets bioethics: the 10Rs ethical principles in research. <i>Ciência Animal Brasileira</i>, 23. https://doi.org/10.1590/1809-6891v22e-70884 • Cao, W., Chen, Z., Yang, M., Guan, H., Cheng, X., Zhang, M., Lin, F., Xiao, Y., Ling, M., Liang, C., & Chen, J. (2024). Construction of self-supported TiO₂ nanotube arrays with hybrid point defect engineering: A bifunctional anode for Li⁺/Na⁺ storage. <i>Acta Materialia</i>, 277, 120228. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120228

- Cardona Gallo, S. A., Agudelo, E. A., Gaviria Restrepo, L. F., & Barrios Ziolo, L. F. (2018). Techniques to determine toxicity in industrial wastewater contaminated with dyes and pigments. *DYNA*, 85(207), 316–327. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.71915>
- Chacón, O. O., Cobas, V., & Reguera Ruiz, E. (2020). *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias Foro Sobre la Apropiación Social de Tecnologías para la Gestión Sostenible del Agua RED Temática CONACYT: Gestión de la Calidad y Disponibilidad del Agua Surface Engineering of Iron Oxide Nanostructures for the Removal of Water Contaminants*. <http://www.rlac.buap.mx>
- Chen, P., Wang, J., Xue, Y., Wang, C., Sun, W., Yu, J., & Guo, H. (2024). From challenge to opportunity: Revolutionizing the monitoring of emerging contaminants in water with advanced sensors. *Water Research*, 265, 122297. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122297>
- David, T. M., Dev, P. R., Wilson, P., Sagayaraj, P., & Mathews, T. (2022). A critical review on the variations in anodization parameters toward microstructural formation of TiO₂ nanotubes. *Electrochemical Science Advances*, 2(4). <https://doi.org/10.1002/elsa.202100083>
- Fang, Z., Huang, R., Chelme-Ayala, P., Shi, Q., Xu, C., & Gamal El-Din, M. (2019). Comparison of UV/Persulfate and UV/H₂O₂ for the removal of naphthenic acids and acute toxicity towards *Vibrio fischeri* from petroleum production process water. *Science of The Total Environment*, 694, 133686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133686>
- Foti Luca. (2022). *Advanced Oxidation Processes (AOP): solutions for the degradation of emerging contaminants in liquid phases* (University of Basilicata, Ed.).
- Gaikwad, R. W., Sonawane, A. V., Hakke, V. S., Sonawane, S. H., Gaikwad, M. S., Lakhera, S. K., Babu G, V., Warade, A. R., Urgunde,

A. B., & Sapkal, V. S. (2024). Application of apophyllite and thomsonite natural zeolite as modified adsorbents for the removal of zinc from acid mine drainage. *Chemosphere*, 350, 141095. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141095>

- Ge, S., Tian, W., Lou, Z., Wang, X., Zhuang, L.-L., & Zhang, J. (2024). Long-term toxicity assessment of antibiotics against *Vibrio fischeri*: Test method optimization and mixture toxicity prediction. *Journal of Hazardous Materials*, 469, 133933. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133933>
- Ghosh, M., Dey, P., Das, A., Giri, A., Nath, S., & Giri, S. (2024). Evaluation of arsenic induced genotoxicity and its impact on life processes of *Daphnia magna*. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 899, 503804. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503804>
- He, J., Chen, J., Liu, S., Lin, L., Zhang, Y., Xiao, S., & Cao, S. (2023). Activated carbon modified titanium dioxide/bismuth trioxide adsorbent: One-pot synthesis, high removal efficiency of organic pollutants, and good recyclability. *Journal of Colloid and Interface Science*, 648, 1034–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.05.206>
- Hoppen, M. I., Carvalho, K. Q., Ferreira, R. C., Passig, F. H., Pereira, I. C., Rizzo-Domingues, R. C. P., Lenzi, M. K., & Bottini, R. C. R. (2019). Adsorption and desorption of acetylsalicylic acid onto activated carbon of babassu coconut mesocarp. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102862. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102862>
- Huynh, N. C., Nguyen, T. T. T., Nguyen, D. T. C., & Tran, T. Van. (2023). Occurrence, toxicity, impact and removal of selected non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): A review. *Science of The Total Environment*, 898, 165317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165317>

- Hybiak, J., Broniarek, I., Kiryczyński, G., Los, Laura. D., Rosik, J., Machaj, F., Sławiński, H., Jankowska, K., & Urasińska, E. (2020). Aspirin and its pleiotropic application. *European Journal of Pharmacology*, 866, 172762. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2019.172762>
- Islam, Md. A., Nazal, M. K., Akinpelu, A. A., Sajid, M., Alhussain, N. A., Billah, R. E. K., & Bahsis, L. (2024). Novel activated carbon derived from a sustainable and low-cost palm leaves biomass waste for tetracycline removal: Adsorbent preparation, adsorption mechanisms and real application. *Diamond and Related Materials*, 147, 111375. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111375>
- Ivanovskaya, M., Chernyakova, K., Ovodok, E., Poznyak, S., Kotsikau, D., & Azarko, I. (2022). Nature of paramagnetic defects in black titanium dioxide nanotubes. *Materials Chemistry and Physics*, 278, 125703. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125703>
- Kong, Q., Shi, X., Ma, W., Zhang, F., Yu, T., Zhao, F., Zhao, D., & Wei, C. (2021). Strategies to improve the adsorption properties of graphene-based adsorbent towards heavy metal ions and their compound pollutants: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125690. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125690>
- Li, F., Yue, S., Zhao, Z., Liu, K., Wang, P., & Zhan, S. (2024). Application of molecularly imprinted polymers in the water environmental field: A review on the detection and efficient removal of emerging contaminants. *Materials Today Sustainability*, 27, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100904>
- Li, X., Zhang, L., Yang, Z., Wang, P., Yan, Y., & Ran, J. (2020). Adsorption materials for volatile organic compounds (VOCs) and the key factors for VOCs adsorption process: A review. *Separation and Purification Technology*, 235, 116213. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116213>

- Liang, A., Wu, F., Li, C., Yu, Y., Dong, Z., Chen, G., Yu, F., Yuwen, Y., & Liu, D. (2022). Aspirin inhibits stem cell proliferation during freshwater *Dugesia japonica* regeneration by STAT3/SOX2/OCT4 signaling pathway. *Aquatic Toxicology*, 247, 106158. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106158>
- Lotfi, S., Ahmadi, S., & Kumar, P. (2022). Ecotoxicological prediction of organic chemicals toward *Pseudokirchneriella subcapitata* by Monte Carlo approach. *RSC Advances*, 12(38), 24988–24997. <https://doi.org/10.1039/D2RA03936B>
- Luo, X., Xu, T., Ngan, D. K., Xia, M., Zhao, J., Sakamuru, S., Simeonov, A., & Huang, R. (2024). Prediction of chemical-induced acute toxicity using in vitro assay data and chemical structure. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 117098. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2024.117098>
- Milenković, I., Radotić, K., Despotović, J., Lončarević, B., Lješević, M., Spasić, S. Z., Nikolić, A., & Beškoski, V. P. (2021). Toxicity investigation of CeO₂ nanoparticles coated with glucose and exopolysaccharides levan and pullulan on the bacterium *Vibrio fischeri* and aquatic organisms *Daphnia magna* and *Danio rerio*. *Aquatic Toxicology*, 236, 105867. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105867>
- Mu, R., Liu, B., Chen, X., Wang, N., & Yang, J. (2020). Hydrogel adsorbent in industrial wastewater treatment and ecological environment protection. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101107. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101107>
- Nordin, A. H., Abdul Samad, N., Paiman, S. H., Md Noor, S. F., Rushdan, A. I., & Ngadi, N. (2024). A mini review on aspirin removal by carbon/noncarbon-based adsorbents from aqueous solution. *Materials Today: Proceedings*, 96, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.373>

- Nordin, A. H., Ngadi, N., Othman, N. F. H., Razali, N. A., Nabgan, W., Alam, M. N. H. Z., Wong, S., & An, E. H. (2020). Adsorptive Removal of Acetylsalicylic Acid in Wastewater Onto Crosslinked-Chitosan. *Proceedings of the Third International Conference on Separation Technology 2020 (ICoST 2020)*. <https://doi.org/10.2991/aer.k.201229.019>
- Parolini, M. (2020a). Toxicity of the Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs) acetylsalicylic acid, paracetamol, diclofenac, ibuprofen and naproxen towards freshwater invertebrates: A review. *Science of The Total Environment*, 740, 140043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140043>
- Parolini, M. (2020b). Toxicity of the Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs (NSAIDs) acetylsalicylic acid, paracetamol, diclofenac, ibuprofen and naproxen towards freshwater invertebrates: A review. *Science of The Total Environment*, 740, 140043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140043>
- Pellenz, L., de Oliveira, C. R. S., da Silva Júnior, A. H., da Silva, L. J. S., da Silva, L., Ulson de Souza, A. A., de Souza, S. M. de A. G. U., Borba, F. H., & da Silva, A. (2023). A comprehensive guide for characterization of adsorbent materials. *Separation and Purification Technology*, 305, 122435. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122435>
- Pica Granados, Y., & Lerdo de Tejada Brito, A. (2003). *Toxicity analysis in water* (Mexican Institute of Water Technology, Ed.; Vol. 1). 2003.
- Puga, M. L., Venturini, J., ten Caten, C. S., & Bergmann, C. P. (2022). Influencing parameters in the electrochemical anodization of TiO₂ nanotubes: Systematic review and meta-analysis. *Ceramics International*, 48(14), 19513–19526. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.059>

- Ramaripa, P. S., Modibane, K. D., Seleka, W. M., Somo, T. R., Makhado, E., Makgopa, K., & Ogunbayo, T. B. (2024). Recent applications of analytical techniques and electrochemical methods in characterizations of the titanium dioxide composites. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(1), 100444. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100444>
- Rathi, B. S., & Kumar, P. S. (2021). Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. *Environmental Pollution*, 280, 116995. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116995>
- Scrimieri, L., Velardi, L., Serra, A., Manno, D., Ferrari, F., Cantarella, M., & Calcagnile, L. (2020). Enhanced adsorption capacity of porous titanium dioxide nanoparticles synthesized in alkaline sol. *Applied Physics A*, 126(12), 926. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04103-2>
- Sivaprakash, V., & Narayanan, R. (2021). Synthesis of TiO₂ nanotubes via electrochemical anodization with different water content. *Materials Today: Proceedings*, 37, 142–146. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.657>
- Sobanska, M., Cesnaitis, R., Versonnen, B., & Nyman, A.-M. (2024). Toxicity testing, aquatic. In *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 323–330). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00015-4>
- Srain, H. S., Beazley, K. F., & Walker, T. R. (2021). Pharmaceuticals and personal care products and their sublethal and lethal effects in aquatic organisms. *Environmental Reviews*, 29(2), 142–181. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0054>
- Su, Y., Zhao, Q., Du, J., Liu, C., Jiang, X., Wei, W., & Tong, X. (2023). Pickering emulsion-enhanced *Vibrio fischeri* assay for ecotoxicity assessment of highly hydrophobic polycyclic aromatic hydrocarbons. *Chemosphere*, 313, 137470. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137470>

- Sudarsan, J. S., Dogra, K., Kumar, R., Raval, N. P., Leifels, M., Mukherjee, S., Trivedi, M. H., Jain, M. S., Zang, J., Barceló, D., Mahlkecht, J., & Kumar, M. (2024). Tricks and tracks of prevalence, occurrences, treatment technologies, and challenges of mixtures of emerging contaminants in the environment: With special emphasis on microplastic. *Journal of Contaminant Hydrology*, 265, 104389. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104389>
- Tischler, A. H., Vanek, M. E., Peterson, N., & Visick, K. L. (2021). Calcium-Responsive Diguanylate Cyclase CasA Drives Cellulose-Dependent Biofilm Formation and Inhibits Motility in *Vibrio fischeri*. *MBio*, 12(6). <https://doi.org/10.1128/mBio.02573-21>
- Torres, I. Z., de Jesús Pérez Bueno, J., Torres López, C. Y., Rojas, L. L., Mendoza López, M. L., & Vong, Y. M. (2016a). Nanotubes with anatase nanoparticulate walls obtained from NH₄ TiOF₃ nanotubes prepared by anodizing Ti. *RSC Advances*, 6(47), 41637–41643. <https://doi.org/10.1039/C6RA05738A>
- Torres, I. Z., de Jesús Pérez Bueno, J., Torres López, C. Y., Rojas, L. L., Mendoza López, M. L., & Vong, Y. M. (2016b). Nanotubes with anatase nanoparticulate walls obtained from NH₄ TiOF₃ nanotubes prepared by anodizing Ti. *RSC Advances*, 6(47), 41637–41643. <https://doi.org/10.1039/C6RA05738A>
- Yoo, J., & Lee, K. (2023). TiO₂ nanotubes fabricated by electrochemical anodization in molten o-H₃PO₄-based electrolyte: Properties and applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 63, 101672. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2022.101672>
- Zakir, O., Idouhli, R., Elyaagoubi, M., Khadiri, M., Aityoub, A., Koumya, Y., Rafqah, S., Abouelfida, A., & Outzourhit, A. (2020). Fabrication of TiO₂ Nanotube by Electrochemical Anodization: Toward Photocatalytic Application. *Journal of Nanomaterials*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/4745726>