

# Universidad del Mar

## Campus Puerto Ángel



**“Evaluación de la generación de los radicales •OH en un proceso fotocatalítico en distintos tipos de reactores, mediante la reacción indirecta de la cumarina”**

Tesis

Que para obtener el Título Profesional de  
**Ingeniero Ambiental**

Presenta:

**José Alejandro Ortiz Vidal**

Directora:

Dra. María del Rosario Enríquez Rosado

Puerto Ángel, Oaxaca 2025

## **Dedicatoria**

A mi mamá, Guillermina Isabel Vidal Ramírez, la persona que más quiero y amo en la vida. Gracias por tantos y bellos recuerdos a su lado; sus consejos, sabiduría, principios y valores que viven mí. El amor que siempre nos brindó perdurara por el resto de nuestras vidas y más allá de estas. Espero que algún día nos volvamos a reunir y hacer los planes que no pudimos completar en esta vida.

A mi papá, José Antonio Ortiz Ramírez. Si la vida me diera la oportunidad de elegir nuevamente a mi padre, lo elegiría a usted sin dudarlo. Gracias por ser un padre y un amigo con el que me puedo expresar libremente, por estar en presente en los buenos y no tan buenos momentos, por escuchar y confiar. Me siento realmente afortunado por tenerlo en mi vida y espero seguir creando recuerdos inolvidables juntos.

A mi hermana mayor Amor, quien me aconseja, comprende y cuida desde pequeño, por decirme las palabras adecuadas a cada situación complicada. Gracias por creer en mí, por darme ánimos, y estar pendiente de toda la familia. Eres una excelente persona, una madre ejemplar y figura a seguir.

A mi hermano mayor Toño que, a pesar de tener un carácter fuerte, tiene un enorme corazón. Siempre fuiste un punto de apoyo y una persona que admire desde mi infancia, gracias por mostrarme lo que la vida puede ofrecerme.

A mi hermano Ángel, que es la persona con la que considero que eh pasado más tiempo en esta vida, con la cual comparto una infinidad de gustos, de momentos irrepetibles, discusiones, peleas, despedidas y reencuentros. Gracias por existir y por crecer junto a mí.

## Agradecimientos

A la Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel, por brindarme los espacios, equipos y facilidades durante mi estadía. En especial a la carrera de Ingeniería Ambiental por el apoyo constante a lo largo de estos años. Los conocimientos adquiridos son de gran valor y más que suficientes para transitar los caminos venideros.

A mi directora y profesora, Dra. María del Rosario Enríquez Rosado, por sus enseñanzas, revisiones, consejos y regaños a lo largo de este proceso, los cuales contribuyeron enormemente en mi crecimiento profesional y personal.

A mis revisores Dra. Ivonne Sandra Santiago Morales, Dr. Ever Peralta Reyes, M. en C. Cristóbal Santos Santos y Dr. Miguel Velásquez Manzanares por su tiempo, esfuerzo y valiosas sugerencias que enriquecieron este trabajo.

A la M. Roció Gutiérrez Ortiz, quien me apoyó a lo largo de mi estadía con consejos, enseñanzas, y regaños necesarios. Gracias por enseñarme su pasión y dedicación a la ciencia, así como su preocupación hacia el bienestar de los alumnos.

A mi familia paterna y materna que siempre me recibieron con mucho cariño y aprecio en cada ocasión que nos veíamos, muchos de mis recuerdos de mi infancia están con ustedes, gracias tíos, primos, abuelos, por estar presentes en mi vida, los quiero mucho.

A mi abuelita Ofelia, quien me brindo amor y apoyo incondicional. Gracias por cada comida que me preparó desde que era pequeño, y que hasta el día de hoy tengo la fortuna de seguir disfrutando. Su cariño y cuidado han sido un regalo invaluable en mi vida. Espero algún día cocinar, al menos, la mitad de bien que usted.

A mis amigos que formaron una bonita conexión conmigo en este camino. A mis compañeros y amigos de la carrera con los que conviví más de 5 años, y que pasé momentos llenos de felicidad, risas, desvelos y demás experiencias, Alexis, Chucho, Frida, Lalo, Lizbeth, Marlo, Diego, Cid, muchas gracias. A mis ex romíos David, Michelle, Luis, Jackeline, Carlos por estar en su momento 24/7 conviviendo, cocinando, festejando, llorando, gracias por los innumerables momentos junto a ustedes. A los que aún seguimos conviviendo en cercanía a pesar de los años transcurridos, Laura, Nere, Daniela, gracias por seguir en contacto y apoyarnos mutuamente, tenerlas cerca me hizo sentir en un hogar. A mis más “recientes” amigos que tuve la oportunidad de formar, Alexa, Liliana, Manuel, Ada, Esmeralda, gracias por tantos buenos momentos en estos últimos años, hicieron que mi vida se tornara de risas y alegría. A mis compañeros y amigos del básquet, Osva, Joaco, Lili, Gibran, Ameyali, gracias por aceptarme y jugar

conmigo en todos los torneos y retas que se realizaron, me divertí mucho. Muchas gracias por permitirme ser parte de su vida, hicieron que la mía siempre estuviera llena de matices y colores.

A los que en su momento formaron parte importante de mi vida, pero diferentes motivos ya no lo están, les agradezco enormemente las lecciones de vida que me brindaron, por hacerme crecer y madurar para crear una mejor versión de mí mismo.

Y, finalmente, a mí mismo por seguir en el camino a pesar de las situaciones, por pedir ayuda cuando lo necesitaba, por intentar seguir disfrutando de las pequeñas cosas que la vida ofrece, y por intentar, cada día, ser una mejor persona.

## Índice

Índice de Figuras .....	VI
Índice de Tablas .....	VI
1.- Introducción .....	1
2.- Marco teórico.....	3
2.1 Procesos de oxidación avanzada (POAs).....	3
2.2 Fotocatálisis Heterogénea .....	3
2.3 Fotocatalizadores comúnmente usados .....	5
2.4 Fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO <sub>2</sub> ) .....	5
2.4.1 Parámetros que influyen en el proceso de Fotocatálisis con TiO <sub>2</sub> .....	6
2.5 Tipos de reactores.....	7
2.5.1 Reactores fotocatalíticos.....	7
2.5.2 Mecanismo de fotocatalisis heterogénea con TiO <sub>2</sub> .....	12
2.6 Detección radicales hidroxilo ( •OH).....	13
2.6.1 Métodos directos.....	13
2.6.2 Métodos indirectos.....	14
2.7 Método fluorescente para la detección del radical •OH .....	15
2.8 Propiedades de la cumarina .....	16
2.8.1 Propiedades fluorescentes.....	18
2.9 Teoría de la espectrometría de luminiscencia .....	19
2.9.1 Espectroscopía de fluorescencia molecular .....	19
2.9.2 Fluorescencia y fosforescencia .....	19
2.9.3 Estados excitados que producen fluorescencia y fosforescencia .....	20
2.9.4 Variables que afectan a la fluorescencia y la fosforescencia.....	21
2.10 Fluorescencia .....	22
2.10.1 Efecto de filtro interno .....	22
3.- Antecedentes.....	24
4.- Justificación .....	28
5.- Hipótesis.....	29
6.- Objetivos: .....	30
7.- Metodología.....	31
7.1.2 Determinación de 7-hidroxycumarina .....	32
7.1.3 Generación de •OH.....	32

7.2 Sistema fotocatalítico heterogéneo con TiO <sub>2</sub> en suspensión .....	33
7.3 Sistema fotocatalítico heterogéneo con TiO <sub>2</sub> inmovilizado.....	34
7.3.1. Preparación de TiO <sub>2</sub> inmovilizado en soportes de barro .....	35
7.3.1.1. Elaboración de soportes .....	35
7.3.1.2. Impregnación de capas de TiO <sub>2</sub> sobre soportes.....	37
8. Resultados y discusiones .....	39
8.1 Reactor con TiO <sub>2</sub> en suspensión .....	39
8.1.1 Degradación de la cumarina en el reactor en suspensión .....	39
8.1.2 Generación de 7-hidroxycumarina en el reactor en suspensión.....	40
8.1.3 Efecto del pH en la generación fotocatalítica de 7-hidroxycumarina en un reactor en suspensión .....	42
8.1.4 Velocidad de generación de la 7-hidroxycumarina en un reactor con TiO <sub>2</sub> en suspensión....	43
8.2 Reactor con TiO <sub>2</sub> inmovilizado .....	44
8.2.1 Degradación de la cumarina en el reactor inmovilizado .....	44
8.2.2 Generación de 7-hidroxycumarina en el reactor inmovilizado .....	45
8.2.3 Efecto del pH en la generación fotocatalítica de 7-hidroxycumarina en un reactor con TiO <sub>2</sub> inmovilizado.....	46
8.2.4 Velocidad de generación de •OH en un reactor inmovilizado .....	47
8.3 Generación de •OH en ambos reactores .....	48
9. Conclusiones .....	50
10. Referencias bibliográficas .....	51

## Índice de Figuras

Figura 1. Mecanismo de la fotocatalisis en una partícula de semiconductor.....	4
Figura 2. Reactor por lotes .....	8
Figura 3. Reactor de flujo laminar .....	10
Figura 4. Estructura de la cumarina [39]. .....	17
Figura 5. Estados de excitación. ....	20
Figura 6. Diagrama de flujo para la cuantificación de $\bullet\text{OH}$ , usando $\text{TiO}_2$ como catalizador .....	31
Figura 7. Diagrama de flujo para la generación y cuantificación de $\bullet\text{OH}$ .....	32
Figura 8. Sistema fotocatalítico con $\text{TiO}_2$ en suspensión.....	33
Figura 9. Sistema fotocatalítico con $\text{TiO}_2$ inmovilizado.....	34
Figura 10. Reactor fotocatalítico por lotes con recirculación total.....	35
Figura 11. Molino de cuarzo y tamiz de 420 $\mu\text{m}$ de poro.....	36
Figura 12. Placas de barro.....	36
Figura 13. Rampa de temperatura utilizada para la cocción de los soportes de barro .....	37
Figura 14. Sistema usado para impregnar las placas de barro .....	37
Figura 15. Rampa de temperatura utilizada para la calcinación de $\text{TiO}_2$ soportado sobre barro.....	38
Figura 16. Degradación de la cumarina a diferentes concentraciones en reactor en suspensión ( $[\text{TiO}_2]=1.5 \text{ g/L}$ ). .....	40
Figura 17. Generación de 7-hidroxicumarina a diferentes concentraciones de cumarina en reactor en suspensión ( $[\text{TiO}_2]=1.5 \text{ g/L}$ ). .....	41
Figura 18. Espectros de absorción UV-vis en el reactor con $\text{TiO}_2$ en suspensión.....	41
Figura 19. Generación de 7-hidroxicumarina a diferentes valores de pH en un reactor con $\text{TiO}_2$ suspensión ( $[\text{TiO}_2]=1.5 \text{ g/L}$ , $[\text{Cou}]= 50 \text{ ppm}$ ). .....	43
Figura 20. Degradación de la cumarina a diferentes concentraciones en reactor inmovilizado ( $Q=50 \text{ L/h}$ ). .....	45
Figura 21. Generación de 7-hidroxicumarina a diferentes concentraciones de cumarina en un reactor inmovilizado ( $Q=50 \text{ L/h}$ )......	46
Figura 22. Generación de 7-hidroxicumarina a diferentes pH reactor con $\text{TiO}_2$ inmovilizado ( $[\text{Cou}]= 50 \text{ ppm}$ , $Q=50 \text{ L/h}$ ).....	47
Figura 23. Generación de 7-hidroxicumarina en el reactor fotocatalítico en suspensión ( $[\text{TiO}_2]=1.5 \text{ g/L}$ ) y en el Inmovilizado ( $Q=50 \text{ L/h}$ ). $[\text{Cou}]= 50 \text{ ppm}$ .....	48

## Índice de Tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de reactores con el catalizador en suspensión e inmovilizado .....	10
Tabla 2. Esquema de reacción fotocatalítica [14, 31]......	12
Tabla 3. Moléculas sonda para la determinación de especies reactivas del oxígeno más usadas [32].	14
Tabla 4. Comparación del uso entre la cumarina y el ácido tereftálico como moléculas sonda para la determinación de $\bullet\text{OH}$ [5, 35]......	16
Tabla 5. Propiedades físicas y químicas de la cumarina [40] y [41]. .....	17
Tabla 6. Degradación de la cumarina en sistemas fotocatalíticos en diferentes estudios científicos ....	24
Tabla 7. Generación de 7-hidroxicumarina en sistemas fotocatalíticos en diferentes estudios científicos .....	26
Tabla 8. Constantes de generación de 7-hidroxicumarina a concentraciones bajas de cumarina en el sistema con $\text{TiO}_2$ en suspensión.....	44

Tabla 9. Constantes de generación de 7-hidroxycumarina a concentraciones bajas de cumarina en el sistema con TiO <sub>2</sub> inmovilizado .....	47
Tabla 10. Velocidad de generación de 7-hidroxycumarina a una concentración de 50 ppm de cumarina en ambos sistemas .....	49