

# Universidad del Mar

Campus Puerto Ángel



## Desinfección fotocatalítica de *E. coli*, en un reactor de placa plana con $\text{TiO}_2$ inmovilizado.

Tesis

Que para obtener el Título Profesional de

**Ingeniera Ambiental**

Presenta:

**Karla Guzmán Ruiz**

Directora:

Dra. María del Rosario Enríquez Rosado

Puerto Ángel, Oaxaca 2019

Se agradece al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el financiamiento a través del Proyecto para Fortalecimiento de Cuerpos Académicos IDCA-23461-Análisis de Procesos Ambientales y a la Universidad del Mar por la oportunidad de cursar los estudios de licenciatura en Ingeniería Ambiental y poder llevar a cabo el presente trabajo de tesis.

## **Agradecimientos**

Al autor intelectual de mi hermosa vida, a quien debo tantas bendiciones y triunfos como este, gracias *Dios*.

A mis padres, Patricia Ruiz Martínez y Ranulfo Guzmán Gómez, a mis hermanos Erika, Paty y Feli, a mis sobrinitos Arlet y Sebas, por apoyarme incondicionalmente y ser siempre mi fuerza para salir adelante. A cada uno de los miembros de mi familia, abuelos, tíos, primos por animarme y apoyarme siempre que estuvo en sus posibilidades.

A mi directora la Dra. María del Rosario Enríquez Rosado, por el apoyo para realizar el presente trabajo y darme el privilegio de formar parte de su familia académica.

A mis revisores; María del Rocío Gutiérrez Ortiz, Cristóbal Santos Santos, Concepción Martínez Lievana y Edgar Valencia Rojas, por la atención prestada a la presente Tesis y por cada uno de los consejos que pudieron darme.

A todos los que forman parte del equipo de los laboratorios de Ingeniería Ambiental, que de alguna forma contribuyeron a la realización del trabajo de investigación.

A cada uno de mis profesores que aportaron grandes enseñanzas a mi formación profesional, desde mis profesores de nivel básico, hasta la universidad, con especial dedicación a mi profesor Anselmo R. Alcázar, sin duda mi camino hubiera sido diferente de no haberlo encontrado.

A ti Amor, por tu apoyo incondicional, tu ánimo en cada uno de los días difíciles y cada una de tus felicitaciones y abrazos en mis días de triunfo.

A don Jaime y doña Reyna por estar al pendiente de mí, gracias por adoptarme como parte de su familia, haciendo que este proceso fuera más liviano.

A mis amigos de la universidad quienes me acompañaron en este camino y que estuvieron a mi lado compartiendo los mejores momentos; Danita, Jaque, Pablito, Dianita, a mis amigos del hormiguero, a las Oli's, Cristóbal y muchos más que faltaron mencionar.

# Índice

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introducción .....                                                                   | 8  |
| 2. Marco teórico.....                                                                   | 9  |
| 2.1. Contaminación del agua por microorganismos patógenos .....                         | 9  |
| 2.2. Métodos de desinfección convencionales.....                                        | 10 |
| 2.2.1. Cloración .....                                                                  | 10 |
| 2.2.2. Ozonización.....                                                                 | 11 |
| 2.2.3. Desinfección con Radiación Ultravioleta (luz UV).....                            | 11 |
| 2.2.4. Desinfección Solar (SODIS).....                                                  | 12 |
| 2.2.5. Ventajas y Desventajas de los métodos de desinfección convencionales .....       | 12 |
| 2.2.6. Alternativas para la desinfección.....                                           | 13 |
| 2.3. Fotocatálisis heterogénea.....                                                     | 14 |
| 2.3.1. Fotocatálisis Heterogénea con $TiO_2$ .....                                      | 15 |
| 2.4. $TiO_2$ soportado .....                                                            | 17 |
| 2.5. Desinfección por fotocatalisis heterogénea .....                                   | 18 |
| 2.5.1. Mecanismos de Desinfección mediante la FH .....                                  | 19 |
| 2.5.2. Modelos de desinfección .....                                                    | 20 |
| 2.5.3. Parámetros determinantes en la desinfección fotocatalítica.....                  | 22 |
| 3. Antecedentes .....                                                                   | 25 |
| 4. Justificación .....                                                                  | 28 |
| 5. Hipótesis.....                                                                       | 29 |
| 6. Objetivos .....                                                                      | 29 |
| 6.1. Objetivos Específicos .....                                                        | 29 |
| 7. Metodología.....                                                                     | 30 |
| 7.1. Elaboración y acondicionamiento de soportes de barro con $TiO_2$ inmovilizado..... | 30 |
| 7.1.1. Elaboración de soportes de barro.....                                            | 31 |
| 7.1.2. Inmovilización del $TiO_2$ .....                                                 | 32 |

|           |                                                                                           |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.2.      | Preparación y acondicionamiento de la suspensión bacteriana .....                         | 33 |
| 7.2.1.    | Aislamiento de la cepa .....                                                              | 33 |
| 7.2.2.    | Propagación celular a partir de una cepa aislada .....                                    | 34 |
| 7.2.3.    | Preparación de viales de trabajo .....                                                    | 34 |
| 7.2.4.    | Preparación de la suspensión bacteriana estándar .....                                    | 35 |
| 7.3.      | Caracterización hidrodinámica del Reactor Continuo de Placa Plana (RCPP) .....            | 35 |
| 7.3.1.    | Análisis de distribución de tiempos de residencia.....                                    | 35 |
| 7.3.2.    | Descripción del sistema (RCPP).....                                                       | 35 |
| 7.3.3.    | Distribución de tiempos de residencia en el RCPP .....                                    | 36 |
| 7.4.      | Acondicionamiento del sistema fotocatalítico para la desinfección de <i>E. coli</i> ..... | 37 |
| 8.        | Condiciones de operación .....                                                            | 40 |
| 8.1.      | Soportes de Barro con TiO <sub>2</sub> inmovilizado .....                                 | 40 |
| 8.2.      | Características de la cepa <i>E. coli</i> .....                                           | 41 |
| 8.3.      | Caracterización hidrodinámica del RCPP .....                                              | 43 |
| 9.        | Resultados de la desinfección fotocatalítica de <i>E. coli</i> .....                      | 46 |
| 10.       | Conclusiones.....                                                                         | 51 |
| 11.       | Referencias.....                                                                          | 53 |
| ANEXO I   | .....                                                                                     | 59 |
| ANEXO II  | .....                                                                                     | 61 |
| ANEXO III | .....                                                                                     | 62 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Ventajas y desventajas de los métodos de desinfección más utilizados [6, 8]. .....                             | 12 |
| Tabla 2. Reacciones propuestas en la degradación de contaminantes orgánicos con TiO <sub>2</sub> [23] ..                | 17 |
| Tabla 3. Tipos de reactores, empleados para la inactivación de <i>E. coli</i> .....                                     | 24 |
| Tabla 4. Trabajos que han realizado la desinfección fotocatalítica en reactores continuos .....                         | 25 |
| Tabla 5. Condiciones de operación en la desinfección fotocatalítica empleando un soporte de bajo costo. ....            | 27 |
| Tabla 6. Características del TiO <sub>2</sub> Degussa P-25 [67] .....                                                   | 30 |
| Tabla 7. Datos hidráulicos del RCPP, previo al análisis DTR.....                                                        | 36 |
| Tabla 8. Morfología observada en los soportes, en microscopio óptico a 10X y 20X. ....                                  | 41 |
| Tabla 9. Concentraciones de las suspensiones bacterianas en NMP mL <sup>-1</sup> y UFC mL <sup>-1</sup> .....           | 42 |
| Tabla 10. Características hidrodinámicas en el RCPP.....                                                                | 44 |
| Tabla 11. Características del RCPP en recirculación total. ....                                                         | 45 |
| Tabla 12. Condiciones de operación en los experimentos de desinfección .....                                            | 46 |
| Tabla 13. Concentración inicial y final de bacterias <i>E. coli</i> obtenidas en los experimentos de desinfección. .... | 49 |
| Tabla 14. Combinación de tubos positivos y resultados en NMP mL <sup>-1</sup> .....                                     | 60 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Transmisión de microorganismos patógenos, mediante el agua no tratada [6].                                                                                                                                     | 9  |
| Figura 2. Mecanismo de fotoexcitación en una partícula del semiconductor.                                                                                                                                                | 15 |
| Figura 3. Ancho de banda de algunos semiconductores [17]                                                                                                                                                                 | 16 |
| Figura 4. Estructuras cristalinas del TiO <sub>2</sub> [21]                                                                                                                                                              | 16 |
| Figura 5. Etapas del proceso Dip-coating.                                                                                                                                                                                | 18 |
| Figura 6. Reacción de peroxidación lipídica [47].                                                                                                                                                                        | 20 |
| Figura 7. Mecanismo Bactericida de la FH sobre una bacteria de E. coli                                                                                                                                                   | 20 |
| Figura 8. Curvas de inactivación para diferentes modelos cinéticos utilizados en la desinfección fotocatalítica a) Cinética de 1er orden, b) Desinfección exponencial, c) Curva hombro, d) Curva de corte al final [48]. | 21 |
| Figura 9. Esquema metodológico aplicado en el presente trabajo                                                                                                                                                           | 30 |
| Figura 10. Molde utilizado para formar ladrillos de barro.                                                                                                                                                               | 31 |
| Figura 11. Acondicionamiento del soporte (ladrillo de barro) al RCPP                                                                                                                                                     | 31 |
| Figura 12. Proceso de inmersión del soporte de barro.                                                                                                                                                                    | 32 |
| Figura 13. Proceso de secado del TiO <sub>2</sub> inmovilizado sobre el soporte de barro                                                                                                                                 | 32 |
| Figura 14. Metodología suspensión bacteriana                                                                                                                                                                             | 33 |
| Figura 15. Aislamiento de una cepa de E. coli, proveniente de una muestra de agua residual tratada.                                                                                                                      | 33 |
| Figura 16. Metodología para la propagación de la cepa de E. coli.                                                                                                                                                        | 34 |
| Figura 17. Vista superior del reactor de placa plana [69].                                                                                                                                                               | 36 |
| Figura 18. Sistema implementado para los análisis DTR                                                                                                                                                                    | 36 |
| Figura 19. Esquema del sistema de desinfección fotocatalítica.                                                                                                                                                           | 37 |
| Figura 20. Imagen del sistema de desinfección fotocatalítico.                                                                                                                                                            | 38 |
| Figura 21. Metodología del acondicionamiento y desinfección fotocatalítica de una muestra de E. coli.                                                                                                                    | 39 |
| Figura 22. Aspecto de los ladrillos de barro en cada fase del proceso de elaboración.                                                                                                                                    | 40 |
| Figura 23. Soportes de barro con y sin TiO <sub>2</sub> inmovilizado (0, 1, 3 y 5 capas)                                                                                                                                 | 40 |
| Figura 24. Tinción Gram de la cepa aislada.                                                                                                                                                                              | 42 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25. Cinética de crecimiento de E. coli en medio CG a 35° C, 100 rpm.....                                            | 42 |
| Figura 26. Curvas DTR soporte de barro, a 100 L h <sup>-1</sup> .....                                                      | 44 |
| Figura 27. Distribución del tiempo del fluido en el sistema en recirculación.....                                          | 45 |
| Figura 28. Curva DTR a 100 L h <sup>-1</sup> , sistema en recirculación total.....                                         | 45 |
| Figura 29. Curvas de desinfección fotocatalítica con 1 (a), 3 (b) y 5 (c) capas de TiO <sub>2</sub> inmovilizado.<br>..... | 47 |
| Figura 30. Desinfección fotocatalítica, a) Concentración contra tiempo, b) Datos normalizados.<br>.....                    | 48 |
| Figura 31. Curva de reactivación en fase oscura.....                                                                       | 50 |
| Figura 32. Conteo de colonias de E. coli en placa de Agar Bilis Rojo Violeta.....                                          | 59 |



# 1. Introducción

El aumento de la explotación del agua para su uso en actividades cotidianas e industriales ha provocado el incremento de la contaminación de los recursos hídricos, ya que se generan cantidades considerables de aguas residuales, que son descargadas de manera inadecuada, provocando al mismo tiempo una mala calidad de agua potable. La problemática se intensifica porque las enfermedades de origen hídrico a nivel mundial son consecuencia de la contaminación de diferentes cuerpos de agua. En México, se considera que las enfermedades gastrointestinales son el principal problema de salud, y estas son causadas por microorganismos patógenos de origen entérico [1]. La normatividad nacional en materia hídrica toma como microorganismos indicadores a los coliformes fecales, y establece sus límites máximos permisibles para agua de uso y consumo humano, así como para descargas de aguas residuales a cuerpos de agua [2, 3].

Para eliminar a los microorganismos que causan una mala calidad del agua, se llevan a cabo etapas de desinfección dentro de las potabilizadoras o plantas de tratamiento de aguas residuales, en donde la cloración es el método químico mayormente utilizado. Sin embargo se ha reportado que el cloro adicionado al agua, al entrar en contacto con la materia orgánica, desencadena una diversidad de reacciones que genera subproductos potencialmente nocivos para la salud [4].

Entre las alternativas para tratar el agua se encuentran los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), los cuales son un grupo de tecnologías no convencionales que tienen en común, la producción de radicales altamente reactivos como los hidroxilo ( $\text{HO}^*$ ), a través de los cuales son oxidados una amplia variedad de compuestos orgánicos, transformándolos a sustancias más simples, incluso hasta llegar a su mineralización, a diferencia de algunos métodos convencionales que solo se limitan a transferirlos, o bien, que la transformación lleva a la generación de sustancias más tóxicas. En particular uno de los POA mayormente estudiado es la fotocatalisis heterogénea (FH), proceso que se ha utilizado como método de desinfección. En la mayoría de los casos se aplica con  $\text{TiO}_2$  en suspensión, en donde el principal inconveniente es la necesidad de una etapa para la recuperación del fotocatalizador, por lo que se ha optado por desarrollar sistemas con  $\text{TiO}_2$  inmovilizado (soportado). Sin embargo, diversos estudios realizados en este tipo de sistemas indican una disminución en la actividad fotocatalítica para la desinfección debido a problemas de transferencia de masa, en comparación con los sistemas en suspensión.

Es necesario el desarrollo y análisis de sistemas continuos, en donde sea factible el uso de  $\text{TiO}_2$  inmovilizado para la inactivación de microorganismos en agua, considerando que el contacto entre las bacterias y fotocatalizador desempeñan un papel determinante en la eficiencia del proceso. Por lo anterior el objetivo del presente trabajo fue evaluar el grado de desinfección de agua sintética con *E. coli*, que se alcanza en un reactor fotocatalítico de placa plana, operando bajo condiciones de flujo continuo con un soporte de bajo costo utilizado para soportar  $\text{TiO}_2$ .