



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**Nanopartículas de plata soportadas en $Ti_{1-x}CexO_2$: síntesis y
aplicación antibacterial**

Tesis

Para obtener el grado

Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

ALUMNO:

I.Q. AMERICA ABISAY MONDRAGON HERRERA

DIRETOR DE TESIS:

D.C. ROBERTO GUERRA GONZALEZ

CO-DIRECTOR DE TESIS:

D.C. RAMIRO ESCUDERO GARCÍA

DIRECTORA EXTERNA:

M.C. ALEJANDRA SANTANA CRUZ

Morelia, Michoacán, septiembre 2021.

Dedicatoria

A mi madre, la señora Emilia Herrera Salgado, porque sin ella nada de esto hubiera sido posible, por su apoyo, su sacrificio, su trabajo y sus consejos, sin ti, yo no podría lograr esto.

Agradecimientos

Para todas las personas que hicieron que todo esto se hiciera posible:

A mis padres, mi tía Maribel y mi familia en general, sin su apoyo, confianza, consuelo y consejos, yo no sería la profesionalista que soy hoy en día.

A Luis Arces, porque durante todos estos años siempre se ha esforzado por crear una mejor versión de mí, sin todo su apoyo, tanto en el laboratorio, como durante este proceso, sus correcciones, confianza, cariño, motivación, paciencia y dedicación, nada de esto hubiera sido posible.

A Lucy, quien ha estado durante todos estos años ayudándome a ser cada día mejor persona, ofreciéndome siempre su amistad y apoyo incondicional, gracias por todo amiga.

A Lucia, quien ha tenido la paciencia de soportar todos mis dramas durante este proceso, por estar siempre ahí, por tu infinita amistad.

A Maehvi por todas esas terapias triturando roquitas.

A Dani, Lu, Maya, Ale, Grey, Ana, Alo, Lluvia, Tania, Brenda, Ulises, Daniel, Pepe, Pedro, Poncho, Chang, Dama, América, Alex y Bárbara, por todo su apoyo durante la realización de este proyecto, consejos, paciencia, y cariño que me han brindado siempre.

A mis asesores el Dr. Roberto Guerra, quien siempre me ha apoyado, y me ha formado como profesionalista desde hace más de 7 años, al Dr. Ramiro Escudero, por todas sus valiosas aportaciones, para la excelencia de este proyecto.

A los miembros de la mesa sinodal, el maestro Gabriel Martínez, a quien considero como un amigo, la Dra. Maricela Villicaña, quien me ayudo con gran parte de esto y a la maestra Alejandra Santana, quien siempre estuvo al pendiente de este proyecto, contribuyendo en gran medida a todo el trabajo.

Por último, no me resta más que agradecer a mi aula mater la UMSNH, por todos los espacios brindados, y a Conacyt por ayudarme a realizar una de mis metas.

Contenido

Ilustraciones	5
Tablas	7
Resumen.....	8
Abstract	9
1.-Introducción.....	10
2.- Marco Teórico	12
2.1.- Nanomateriales.....	12
2.1.1 Bacterias y metales	12
2.1.2 Nanopartículas de plata y su acción antibacterial	13
2.1.3.- Síntesis mediante sol-gel	14
2.1.4.- Oxido de Titanio	16
2.1.5.- Oxido de Cerio.....	17
2.2.- Tipos de bacterias	18
2.2.1.- Gram Positivas	18
2.2.2.- Gram Negativas.....	20
2.3.- Funcionamiento de un reactor de microondas	25
3.- Antecedentes	26
3.1.- Síntesis de materiales	26
3.2.- Dopaje con diferentes metales	28
3.3.- Por aplicación	30
4.- Justificación.....	32
5.- Hipótesis.....	32
6.- Objetivos	33
6.1.- General.....	33
6.2.- Específico	33
7.- Metodología.....	33
7.1.- Síntesis del material	33
7.1.1.- Reactivos	33
7.1.2.- Disolución de sal precursora de cerio	34
7.1.3.- Síntesis en reactor de microondas.....	34
7.1.4.- Condiciones de operación.....	34

7.1.5.- Secado y molienda del producto	35
7.1.6.- Tratamiento térmico (calcinación).....	35
7.1.7.- Método de impregnación húmeda incipiente	35
7.2.- Caracterización del material	36
7.2.1.- Difracción de rayos X.....	36
7.2.2.- Determinación de área superficial (BET)	37
7.2.3.- Espectroscopia IR	38
7.2.4.-Microscopia electrónica de barrido	38
7.3.- Cepas bacterianas	39
7.3.1.- Preparación de caldos de cultivo	39
7.3.2.- Cultivo de cepas bacterianas	39
7.3.3.- Método de determinación de sensibilidad antimicrobiana por dilución	39
7.3.3.1 Turbidez estándar para la preparación del inóculo	39
7.3.3.2 Determinación de la concentración mínima bactericida	40
7.3.3.3 Crecimiento bacteriano en presencia de los materiales.....	41
8.- Análisis de resultados.....	42
8.1.- Síntesis de materiales	42
8.1.1.- Material TiO ₂ puro.....	42
8.1.2.- Material Ti _{1-x} Ce _x O ₂ 2% Ce, 3 % Ag.....	44
8.1.3.- Material Ti _{1-x} Ce _x O ₂ 4% Ce, 3 % Ag.....	49
8.2.- Evaluación antimicrobial	55
8.2.1.- Concentración mínima inhibitoria y concentración mínima bactericida.....	55
8.2.3.- Eliminación de colonias bacterianas	58
9.- Análisis de resultados.....	77
10.- Conclusiones	78
11.- Referencias.....	79

Ilustraciones

Ilustración 1. Perfil de calentamiento de una sustancia por microondas y por el método convencional	25
Ilustración 2. Reactor de microondas Anton Paar Synthos 3000.....	35
Ilustración 3. Impregnación húmeda incipiente	36
Ilustración 4. Difractómetro de rayos X	37
Ilustración 5. Microscopio electrónico de barrido	38
Ilustración 6. Diagrama de diluciones para estimación de CMI y CMB.....	41

Ilustración 7. Difractograma TiO_2 puro	42
Ilustración 8. Difractograma del material $\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	44
Ilustración 9. Difractograma del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	45
Ilustración 10. Micrografías del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ a 5000X.....	46
Ilustración 11. Micrografías del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ a 10000X.....	47
Ilustración 12. Espectroscopia de energía dispersiva del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	47
Ilustración 13. Espectrograma del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	48
Ilustración 14. Difractograma del material $\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	50
Ilustración 15. Difractograma del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	51
Ilustración 16.. Micrografías del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ a 5000 X (1).....	52
Ilustración 17. Microscopia del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ a 5000 X (2)	52
Ilustración 18. Micrografías del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ a 10000X.....	53
Ilustración 19. Espectroscopia de energía dispersiva del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	53
Ilustración 20. Espectrograma del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	54
Ilustración 21. Concentración mínima inhibitoria del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	56
Ilustración 22. Concentración mínima inhibitoria del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	56
Ilustración 23. Determinación de concentración mínima inhibitoria del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	57
Ilustración 24. Determinación de concentración mínima del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	57
Ilustración 25. Determinación de concentración mínima inhibitoria del material Ag/TiO_2	58
Ilustración 26. Gráfica de cinética en eliminación <i>Escherichia coli</i> LB Ce 2	59
Ilustración 27. Gráfica de cinética en eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> LB Ce 2	60
Ilustración 28. Gráfica de cinética en eliminación <i>Shigella sonnei</i> LB Ce 2.....	60
Ilustración 29. Gráfica de cinética en eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> LB Ce 2	61
Ilustración 30. Gráfica de cinética en eliminación <i>Escherichia coli</i> UV Ce 2	61
Ilustración 31. Gráfica de cinética en eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> UV Ce 2	62
Ilustración 32. Gráfica de cinética de eliminación <i>Shigella sonnei</i> UV Ce 2.....	63
Ilustración 33. Gráficas de cinética en eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> UV Ce 2	63
Ilustración 34. Gráfica de cinética en eliminación <i>Escherichia coli</i> obs. Ce 2	64
Ilustración 35. Gráfica de cinética en eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> obs. Ce 2	65
Ilustración 36. Gráfica de cinética en eliminación <i>Shigella sonnei</i> obs. Ce 2.....	65
Ilustración 37. Gráfica de cinética de eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> obs. Ce 2	66
Ilustración 38. Gráfica de cinética en eliminación <i>Escherichia coli</i> LB Ce4	67
Ilustración 39. Gráfica de cinética de eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> LB Ce4.....	67
Ilustración 40. Gráfica de cinética de eliminación <i>Shigella sonnei</i> LB Ce4.....	68
Ilustración 41. Gráfica de cinética en eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> LB Ce4	68
Ilustración 42. Gráfica de cinética en eliminación <i>Escherichia coli</i> UV Ce4.....	69
Ilustración 43. Gráfica de cinética en eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> UV Ce4	70
Ilustración 44. Gráfica de cinética en eliminación <i>Shigella sonnei</i> UV Ce4.....	70
Ilustración 45. Gráfica de cinética en eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> UV Ce4	71
Ilustración 46. Gráfica de cinética en eliminación <i>Escherichia coli</i> Obs. Ce4.....	72
Ilustración 47. Gráfica de cinética en eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> Obs. Ce4.....	72
Ilustración 48. Gráfica de cinética en eliminación <i>Shigella sonnei</i> Obs. Ce4	73
Ilustración 49. Gráfica de cinética en eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> Obs. Ce4	74

Ilustración 50. Evidencias de evaluación del material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ VS <i>Escherichia coli</i> en Luz visible.....	76
--	----

Tablas

Tabla 1. Cantidad de sal precursora dopante	34
Tabla 2. Determinación de área superficial para TiO_2	43
Tabla 3. Determinación de área superficial para materiales $\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ y $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	46
Tabla 4. Componentes en porcentaje del material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	48
Tabla 5. Determinación de área superficial para materiales $\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ y $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	51
Tabla 6. Componentes en porcentaje del material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	54
Tabla 7. Concentración mínima inhibitoria en <i>Escherichia coli</i>	55
Tabla 8. Concentraciones mínimas inhibitorias y mínimas bactericidas en los materiales $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ y $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	56
Tabla 9. Concentración mínima inhibitoria en consorcio de bacterias (<i>Escherichia coli</i> y <i>Salmonella typhimurium</i>)	57
Tabla 10. Determinación de CMI y CMB para consorcio de bacterias	58
Tabla 11. Cinética de eliminación <i>Escherichia coli</i> LB Ce2	59
Tabla 12. Cinética de eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> LB Ce 2	60
Tabla 13. Cinética de eliminación <i>Shigella sonnei</i> LB Ce2.....	60
Tabla 14. Cinética de eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> LB Ce2	61
Tabla 15. Cinética de eliminación <i>Escherichia coli</i> UV Ce 2	61
Tabla 16. Cinética de eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> UV Ce 2	62
Tabla 17. Cinética de eliminación <i>Shigella sonnei</i> UV Ce2.....	63
Tabla 18. Cinética de eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> UV Ce2	63
Tabla 19. Cinética de eliminación <i>Escherichia coli</i> Obs. Ce2.....	64
Tabla 20. Cinética de eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> obs. Ce 2	65
Tabla 21. Cinética de eliminación <i>Shigella sonnei</i> obs. Ce 2	65
Tabla 22. Cinética de eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> obs. Ce 2	66
Tabla 23. Cinética de eliminación <i>Escherichia coli</i> LB Ce 4	67
Tabla 24. Cinética de eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> LB Ce4	67
Tabla 25. Cinética de eliminación <i>Shigella sonnei</i> LB Ce4.....	68
Tabla 26. Cinética de eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> LB Ce4	68
Tabla 27. Cinética de eliminación <i>Escherichia coli</i> UV Ce4	69
Tabla 28. Cinética de eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> UV Ce4	70
Tabla 29. Cinética de eliminación <i>Shigella sonnei</i> UV Ce4.....	70
Tabla 30. Cinética de eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> UV Ce4	71
Tabla 31. Cinética de eliminación <i>Escherichia coli</i> Obs. Ce4.....	72
Tabla 32. Cinética de eliminación <i>Salmonella typhimurium</i> Obs. Ce4.....	72
Tabla 33. Cinética de eliminación <i>Shigella sonnei</i> Obs. Ce4	73
Tabla 34. Cinética de eliminación <i>Staphylococcus aureus</i> Obs. Ce4.....	74
Tabla 35. Resumen de cinéticas de todas las evaluaciones	75

Resumen

La contaminación del agua es un problema que afecta a todos los ecosistemas y directamente a los seres humanos, las reservas para nuestro consumo son cada vez más escasas y los métodos de desinfección son costosos y poco efectivos. En este trabajo se sintetizó mediante el método de sol-gel un material a base de TiO_2 , que fue dopado con Ce, y mediante el método de humedad incipiente se le agregó Ag, cuya finalidad es darle un efecto bactericida contra las cepas de bacterias *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Shigella sonnei*, *Salmonella typhimurium* y un consorcio de estas para simular un ambiente más real. Se caracterizó mediante las técnicas, DRX para observar las fases del material, así como el tamaño de cristal, SEM para observar la morfología del material y su superficie, BET, para obtener el área superficial, tamaño y volumen de poro y por último por espectroscopia IR, para observar los enlaces que presentó.

Palabras clave: Sol-gel, microondas, TiO_2 -Ce, *Shigella sonnei*, *Staphylococcus aureus*.

Abstract

Water contamination is a problem that affects all ecosystems and directly to human beings, the reserves for our consumption are increasingly scarce and disinfection methods are expensive and ineffective. In this work, a TiO₂-based material was synthesized by the sol-gel method, which was doped with Ce, and Ag was added by the incipient humidity method, with the purpose of giving it a bactericidal effect against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Shigella sonnei*, *Salmonella typhimurium* bacteria strains and a consortium of these to simulate a more real environment. It was characterized by XRD techniques to observe the phases of the material, as well as the crystal size, SEM to observe the morphology of the material and its surface, BET, to obtain the surface area, pore size and volume and finally by IR spectroscopy, to observe the bonds presented by the material.

1.-Introducción

En la actualidad, los niveles de contaminación son casi críticos tanto para aire, suelo y agua, el calentamiento global es un problema del que cada día se presentan noticias más críticas para el planeta y toda vida que en él se encuentra.

El agua es esencial para la vida, un buen suministro garantiza grandes beneficios a la salud (World Health Organization, 2008). De acuerdo con la OMS cerca de 5 millones de personas mueren cada año por diversas afecciones de la contaminación del agua, 50 % de estas muertes están asociadas a infecciones gastrointestinales. Los mayores riesgos bacterianos se deben a la ingesta de agua contaminada con heces fecales provenientes del propio ser humano y de animales (World Health Organization, 2008; Fenwick, 2006; George et al, 2001; Grabow, 1996). Desde hace tiempo se han buscado métodos para disminuir la contaminación en agua, sin embargo, estos no han sido los más efectivos o amigables con el ambiente, debido a que generan lodos que son considerados residuos peligrosos, además de que es sumamente costoso su tratamiento.

Es, además, bien sabido que la detección de estos microorganismos es difícil, debido a que los métodos tradicionales para su detección son poco sensibles y se tiende a subestimar la carga real bacteriana. Las técnicas de laboratorio para su aislamiento y cuantificación de las que hoy en día se dispone, tardan días en arrojar un resultado, el cual es retrospectivo, el tiempo que tardan en llegar estos resultados puede ser crucial para la salud pública, ya que se encuentra en un riesgo constante.

Uno de los grandes desafíos que se presentan en la actualidad es la reducción en la concentración de patógenos en el agua residual, ya que en algunos casos está es utilizada para otros usos como el agrícola. El agua potable es la prioridad para la disminución de los microorganismos causantes de la mayoría de enfermedades infecciosas que afectan al ser humano.

El uso de desinfectantes es crucial para reducir agentes patógenos en la higiene personal, en el tratamiento de aguas y el uso humano en general (McDonnell & Russell, 1999). En los últimos años la fotocatalisis de semiconductores se ha

estudiado para tratamientos de remoción de contaminantes en agua y aire (Pant, et al, 2016; Opoku et al, 2017). Las bacterias como *S. typhi* y *E. coli* son de principal interés, al ser portadoras de enfermedades a través de alimentos, son responsables de enfermedades como la salmonelosis en el caso de *S. typhi* y de síndrome urémico hemolítico producido por *E. coli*, las cuales son graves y generan consecuencias permanentes en los seres humanos.

El dióxido de titanio (TiO_2) ha sido utilizado como fotocatalizador para fines antimicrobianos (Liou & Chang, 2012). Además, es conocido por diversas propiedades, entre ellas destacan alta fotoactividad, buena estabilidad, bajo costo y baja toxicidad (Pant et al, 2014a, Pant et al, 2019b). El TiO_2 presenta tres estructuras cristalinas: rutilo, anatasa y brookita (Allen et al, 2018). Las fases anatasa y rutilo son las que se utilizan en la fotocatalisis, mientras que la brookita no debido a que es poco estable (Zhang et al, 2008; Di Paola et al, 2013). La plata ha sido utilizada desde tiempos ancestrales como un agente bactericida (Klasen, 2000a, Klasen, 2000b). Los iones de plata presentes en el nitrato de plata y en la sulfadiazina de plata han demostrado su eficacia contra bacterias gram positivas y gram negativas (Benli & Yalin, 2017; Sun et al, 2016; Chen et al, 2013; Mohiti-Asli et al, 2014). Su característica de mayor importancia es su superficie de partículas de pequeño tamaño, la cual favorece su eficacia antimicrobiana y la biodisponibilidad de los materiales utilizados (Ying, 2008). Los materiales heterogéneos han obtenido gran relevancia durante los últimos años, debido a su actividad fotocatalítica (Fujishima & Honda, 1972; Hoffman et al, 1995; Somorjai, 1996; Mills et al, 1997; Burda et al, 2005). Cuando la fase anatasa del TiO_2 , es expuesta a la luz se generan agujeros y una excitación en los electrones, los agujeros son atrapados por el agua y con esto se generan radicales hidroxilos quienes degradan de forma eficaz muchos de los contaminantes orgánicos (Carey et al, 1976; Nadtochenko et al, 2005; Fujishima et al, 2000). Sin embargo, debido a que el TiO_2 funciona bajo condiciones de UV (3.2 eV), desde hace mucho tiempo se ha optado por el dopaje con diversos metales para mejorar su sensibilidad a la luz visible (Williamson, 1939; Anpo et al, 2001; Yu et al, 2005; Asahi et al, 2001; Burda et al, 2003; Khan et al, 2002; Park et al, 2002).

Las partículas de plata permiten activar la excitación a la luz del TiO_2 (Seery et al, 2007). Las nanopartículas de plata aumentan las propiedades del TiO_2 y además esta combinación mejora notablemente las propiedades antimicrobianas de ambos materiales, se cree que la plata mejora la fotoactividad del TiO_2 al reducir la tasa de recombinación de sus portadores de carga foto-excitados y/o al proporcionar más superficie para la adsorción (Sung-Suh et al, 2004; Sclafani, et al, 1997). La gran cantidad de plata liberada, ocasionalmente lleva a acortar la vida efectiva de la actividad antimicrobiana (Wang et al, 1998). Del cerio no se conoce hasta el momento demasiada información sobre su eficacia antibacterial, sin embargo, en 2017 se realizaron algunas síntesis donde se incluía TiO_2 co-dopado con plata y cerio de la cual se pudo observar que bajo luz o en oscuridad dicho material eliminaba > 99.9 % de *E. coli* y *S. aureus* y se comprobó que podía utilizarse para la desinfección de bacterias (Moongraksathum & Chen, 2017).

2.- Marco Teórico

2.1.- Nanomateriales

2.1.1 Bacterias y metales

Tanto la plata como otros metales representan una opción efectiva para la inhibición de microorganismos patógenos, ya que no son tóxicos, ni contaminan las propiedades del agua, generando pocos o nulos subproductos durante la desinfección (Tortora, 2017).

Los microorganismos requieren ciertos iones provenientes de algunos metales para su funcionamiento tal es el caso del calcio, magnesio, sodio, potasio y manganeso. Algunos metales del ambiente son tóxicos y carecen de participación biológica por ejemplo los metales pesados como plomo, cromo, mercurio, arsénico, cadmio, cobre, plata, entre otros, algunos otros son necesarios, pero no representan toxicidad como el zinc, cobalto, níquel, etc.

Los mecanismos por los que las bacterias interactúan con los iones de metales (Cervantes, 1992) son: precipitación extracelular, la unión de cationes con las cubiertas celulares, acumulación intracelular, las reacciones Redox y la expulsión de la membrana, lo cual impide la bioacumulación.

Algunos metales pesados como el cobre y la plata tienen propiedades bactericidas, y en cantidades pequeñas pueden llegar a inhibir el crecimiento bacteriano. Esto se logra gracias a la interacción de los iones de dichos metales con las membranas de los microorganismos.

2.1.2 Nanopartículas de plata y su acción antibacterial

En la antigüedad la plata se utilizaba principalmente para joyería o utensilios de cocina, sin embargo, se cree que algunas de las más antiguas civilizaciones utilizaban la plata para la conservación del agua y sus alimentos (Alexander, 2009), durante mucho tiempo también fue utilizada para la prevención de infecciones en quemaduras (Kalsen, 2000). En la primera mitad del siglo XX antes de la invención de los antibióticos esta se usaba principalmente en solución coloidal para prevenir infecciones, incluso se cree que la denominada “sangre azul” de los nobles estaba asociada con el consumo frecuente de este metal (argiria) (Alexander, 2009). Las nanopartículas de plata han sido de especial interés en las últimas décadas (Saravanan et al, 2018), ya que contienen entre 20 y 15,000 átomos de plata en diámetros inferiores a 100 nm. Debido a su gran relación superficie-volumen estas presentan una destacada actividad antimicrobiana aún a bajas concentraciones (Oves et al, 2018). Además, han demostrado baja citotoxicidad y respuesta inmunológica (Samuel et al, 2020).

Aunque el mecanismo de acción antibacterial de la plata aún no ha sido comprobado, se tienen diversas teorías. Las nanopartículas liberan iones, lo cual es considerado el mecanismo de eliminación (Bapat et al, 2018), debido a la atracción electrostática y la afinidad con las proteínas del azufre, los iones se adhieren a la pared celular y a la membrana citoplasmática, lo cual aumenta la permeabilidad de la membrana y provoca una ruptura en la envoltura de la bacteria (Khorrami et al,

2018). Con la captación de iones las enzimas respiratorias se desactivan, generando oxígeno interrumpiendo la producción del adenosin trifosfato (Ramkumar et al, 2017) y a su vez el ADN es modificado puesto que el azufre y el fósforo forman parte de los componentes principales del ADN, que al interactuar con los iones de plata, puede causar problemas en su replicación, la respiración celular y eventualmente provocar una desaparición del microorganismo, además de inhibir la síntesis de proteínas (Durán et al, 2016). También se cree que al estar presente en tamaños nanométricos dichos iones pueden adentrarse en la membrana celular y modificarla (Liao et al, 2019). Al afectar los grupos fosfato afecta a su vez la señal de transducción y termina generando una apoptosis celular (Li et al, 2019). Entre más esférica o semiesférica es una nanopartícula de plata, libera mayor cantidad de iones y por ende aumenta su eficacia (Shanmuganathan et al, 2017). La presencia de otros componentes en el medio puede afectar su eficacia debido a que estos pueden añadirse y aglomerarse en las nanopartículas dificultando la liberación de iones, además es bien sabido que los iones de plata tienen una mejor liberación en medios ácidos que en básicos o neutros (Jacob et al, 2019).

Las bacterias gram negativas se ven mayormente afectadas debido a que estas poseen una pared celular de menor grosor que las bacterias gram positivas (Meikle et al, 2020). Por último, cuando la nanopartícula posee un tamaño menor a 10 nm esta afecta directamente a la permeabilidad celular (Saravanan, 2018).

2.1.3.- Síntesis mediante sol-gel

El método sol gel es utilizado para la síntesis de materiales cerámicos y óxidos metálicos en forma de polvos o películas delgadas a temperaturas relativamente bajas, en este método una suspensión coloidal o sol es formada mediante reacciones de hidrólisis y condensación.

El sol es sometido a diversas operaciones como el gelificado y secado lo cual lo somete a diferentes cambios de fase y estructura. El método consiste principalmente en las siguientes cuatro etapas:

1. Preparación de la solución coloidal de los precursores como partículas de tamaño menor a 1 mm.
2. Gelificación mediante la coagulación floculación del colide, donde este envejece y cambia su concentración, además de la adición de un electrolito desestabilizador.
3. Secado del gel (xerogel)
4. Calcinación del xerogel para la obtención del material cerámico

El método puede diferenciarse según las sustancias precursoras: fase acuosa (precursores ionizados) o fase orgánica (alcóxidos).

Existen tres tipos de coloides sol. El sol el cual es una suspensión coloidal de partículas sólidas dispersas en un líquido. El aerosol que es una suspensión en la que partículas líquidas o sólidas son finamente subdivididas en un gas y por último la emulsión la cual es una suspensión donde gotas líquidas se encuentran en otro líquido. Los tres son utilizados para generar polímeros o cerámicos, cristalinos y amorfos.

Para obtener el sol se requiere de un metal alcóxido. Esta suspensión se forma al mezclar partículas coloidales en agua a un pH que no permite la precipitación o mediante un precursor líquido alcóxido el cual hidroliza y genera enlaces OH.

Un gel es una red rígida compuesta por poros de tamaños menores a $1\mu\text{m}$ y cadenas poliméricas con una longitud promedio mayor a $1\mu\text{m}$. Al convertirse en gel hay un aumento en la viscosidad. El envejecimiento involucra a la condensación, solución, precipitación y transformaciones en la fase sólida o líquida. Durante la gelificación la poli-condensación continúa en la solución y precipitación del sol. Al envejecer el gel aumenta su resistencia para soportar el rompimiento durante la etapa de secado.

Al secar por evaporación se aumenta la presión capilar y esta causa disminución de la red del gel, dando como resultado el xerogel. Durante el secado el líquido es removido de la red interconectada.

El tratamiento térmico a altas temperaturas del gel poroso favorece un aumento en la densidad eliminando la mayor cantidad posible de poros. Dicha temperatura depende de las dimensiones de la red y el área superficial de la estructura. Se lleva a cabo a temperaturas que rondan los 500°C denominándola sinterización viscosa. Si se lleva a cabo de manera efectiva se puede eliminar de manera completa la porosidad lo cual lleva de un gel poroso a un vidrio. Algunos poros tienen líquido en su interior y son llamados poros líquidos, dependiendo de método mediante el que se eliminen el gel tendrá nombres distintos.

El método sol-gel presenta diferencias las cuales afectan el producto final, formando películas delgadas, polvos o incluso monolitos. Tiene diversas ventajas entre las cuales se encuentran: homogeneidad, pureza y temperaturas relativamente bajas al momento de la preparación.

2.1.4.- Oxido de Titanio

La generación de desechos derivados del crecimiento industrial ha aumentado las últimas décadas, orillando a la búsqueda de tratamientos para la descontaminación del planeta. El TiO_2 , es un semiconductor tipo n, que absorbe luz en la región UV, anfótero y muy estable químicamente. Es utilizado para la degradación de colorantes, grasas y gran cantidad de moléculas orgánicas. (Ochoa et-al, 2010). La fotocatalisis ha jugado un lugar importante en la degradación de contaminantes en solución. El TiO_2 es lo más cercano al semiconductor ideal, debido a su estabilidad, bajo costo y nula toxicidad al ser humano y el medio ambiente. El antecedente más antiguo es de 1964 donde se publicó la oxidación fotocatalítica de la tetralina (Kato et al. 1964). McLintock probó la oxidación fotocatalítica del etileno y propileno en presencia del oxígeno absorbido por el TiO_2 (McLintock et al. 1965). La aportación más importante la publicó Fujishima y Honda en 1972, donde se sumergió TiO_2 en fase rutilo, en una solución acuosa para la fotolisis del agua, marcando un paso importante para la fotocatalisis (Fujishima & Honda, 1972). En 1985 se descubrió la actividad antimicrobiana que posee el TiO_2 contra diversas cepas entre ellas *E. coli* (Matsunaga et al., 1985). Sin embargo, el TiO_2 presenta una gran limitante su

actividad fotocatalítica por si solo se presenta únicamente en la región UV, es por ello que se opta por doparlo con otros elementos o compuestos. En 2004 se utilizaron películas de TiO_2 dopado con Fe para una nueva aplicación, la degradación de naranja de metilo, bajo la luz solar, degradando cerca del 95% en 3-4 h (Sonawane et al 2004). El TiO_2 presenta cuatro fases cristalinas, Brookita, anatasa, rutilo y una de alta presión del tipo $\alpha\text{-PbO}_2$. Para el rutilo y la fase de alta presión cada octaedro comparte lados comunes con otros dos octaedros, la brookita con tres y la anatasa con cuatro (Muller, 2006). Por esta razón el rutilo y la fase de alta presión son las más estables.

El TiO_2 en su fase anatasa es ampliamente utilizado como fotocatalizador por sus diversas características, bajo costo y baja toxicidad (Bevilacqua, 2004). La síntesis de TiO_2 se ha logrado mediante diversos métodos como: síntesis en fase vapor (Akurati et al, 2006), hidrotérmica (Moulson & Herbert, 1992), precipitación controlada (Clauser, 1990), y el tan mencionado sol-gel (Agafonov & Vinogradov, 2008).

2.1.5.- Oxido de Cerio

El óxido de cerio es un fotocatalizador eficiente con un bandgap de 3.2eV con múltiples aplicaciones como en sensores de oxígeno, paneles solares, combustibles, catálisis e incluso dentro de la contaminación atmosférica (Gao et al., 2009; Srivastava et al., 2013; Mehta et al., 2007). Dentro de todas sus aplicaciones destaca la fotocatálisis, la transparencia óptica dentro de la región visible, la elevada reactividad, dureza, su resistencia a altas temperaturas, así como su capacidad de almacenamiento de oxígeno (Xu et al., 2016). Su mejora en la actividad fotocatalítica se atribuye a la presencia del catión Ce^{4+} además de su estructura y morfología, cuya función es atrapar los electrones fotoexcitados, la reducción de Ce^{4+} a Ce^{3+} de manera reversible, le permite el almacenamiento de oxígeno, además de permitir que las partículas actúen como catalizadores recreadores (Zhang et al., 2014; Mauro et al., 2012; Pan et al., 2008; Liu et al., 2009, 2010; Zhang et al., 2013; Ling et al., 2013). Su actividad fotocatalítica y sus estados de oxidación permiten además

una actividad antimicrobiana en materiales basados en óxido de cerio sin necesidad de una excitación. Su efecto antimicrobial, sumado a la nula toxicidad del dióxido de titanio, han resultado efectivos contra bacterias como *E. coli*, *S. typhimurium*, *S. aureus* y *P. aeruginosa*. Además, recientemente se han investigado sus propiedades antimicóticas debido a su resistencia a diferentes fármacos, causando infecciones graves e incluso la muerte en pacientes inmunodeprimidos, en especies tales como *C. albicans*, *C. glabrata* y *C. krusei* (Krishnamoorthy et al., 2014; Hassan et al., 2012; Pujar et al., 2019; Pisal et al., 2019; Firmino et al., 2021).

2.2.- Tipos de bacterias

Las bacterias son microorganismos que forman una parte importante en los ecosistemas ya que juegan un papel importante en la degradación de nutrientes, también son responsables de diversas enfermedades ya que se encuentran prácticamente en todos lados, agua, suelo, aire etc. Las bacterias tienen principalmente tres tipos de formas esférica (cocos), cilíndrica (bacilos) y espiral (espirilos), estas se encuentran agrupadas en pares, racimos y cadenas (Mandigan et al, 2004).

Según Bergey se clasifican en cuatro tipos: eubacterias gram positivas, eubacterias gram negativas, micoplasmas y arqueobacterias.

2.2.1.- Gram Positivas

Las bacterias gram positivas son células que adquieren un color púrpura durante la tinción de estas.

Su pared celular consiste en el espacio periplásmico que se encuentra en la membrana plasmática y una capa gruesa de peptidoglicano que representa entre el 20 y 60 % de su composición.

A diferencia de las gram negativas estas poseen un espacio periplásmico de menor volumen y su pared celular es más gruesa (entre 15 y 80 nm). La pared está compuesta por varias capas de peptidoglicano además de ácidos teicoicos los

cuales la proveen de rigidez al anclarse con su membrana plasmática. Dichos ácidos cumplen una función similar a la membrana externa de las gram negativas ya que están asociados a la permeabilidad y sus interacciones además de que actúan como soporte para las enzimas durante el crecimiento de la pared celular.

Generalmente son más susceptibles a antibióticos que las bacterias gram negativas ya que carecen de membrana externa, sin embargo, algunas cepas han logrado generar resistencia tal es el caso de la *S. aureus*.

2.2.1.1.- *Staphylococcus aureus*

Staphylococcus aureus es una bacteria presente en prácticamente cualquier lugar, es responsable de una amplia gama de infecciones, enfermedades graves e inclusive mortales (Kadariya et al., 2014). Dichas infecciones son cada vez más complicadas de tratar debido a la alta resistencia a antibióticos que presenta esta bacteria incluida la meticilina. Entre el 1.5 y 30 % de la población de E.U. presenta colonización con la cepa de *S. aureus* sensible a la meticilina (Graham et al., 2006), colonizándose principalmente en las fosas nasales (Wertheim et al., 2005). Se cree que hay dos cepas de principal interés la primera es la que se encuentra con casos nosocomiales y la otra es la que se encuentra en comunidades, ambas han desarrollado resistencia a los antibióticos y la de más agresiva y de mayor preocupación es la nosocomial, ya que presenta resistencia a un mayor número de antibióticos. Informes han sugerido que se han presentado más de 80,000 casos con infecciones invasivas con esta bacteria de los cuales se han producido 11,000 muertes, la mayoría relacionada con casos nosocomiales (Dantes et al., 2013). Sin embargo, se ha encontrado una cepa que se ha aislado en un 29% en áreas metropolitanas de estados unidos (Klevens et al., 2007).

Se ha llegado a aislar *S. aureus* resistente a antibióticos en agua y arena de varias zonas públicas (Soge et al., 2009; Yamahara et al., 2012), en aguas municipales (Borjesson et al., 2009; Porrero et al., 2014; Rosenberg Goldstein et al., 2012; Wan & Chou, 2014), hospitalarias (Thompson et al., 2013) y agrícolas, lo cual puede

llegar a causar afecciones ambientales y a la especie humana (Brooks et al., 2014; Wan & Chou, 2014).

Las principales fuentes de generación de *S. aureus* resistente a antibióticos son las aguas tratadas de las plantas municipales y las aguas residuales no tratadas procedentes de desbordamientos de alcantarillados (Tchobanoglous et al., 2003), debido a que en épocas de aguas pluviales estas se desbordan llegando a ríos y lagos sin recibir ningún tratamiento. Aunado a que en zonas con poca densidad poblacional es común encontrar fosas sépticas, las cuales no deberían afectar la calidad de las aguas superficiales, pero al no tener un control ni monitoreo es común que presenten fallas, además de que las cepas resistentes a antibióticos pueden llegar a vivir durante tiempos prolongados en aguas de mares y ríos, pero no duran más de 24 h en piscinas con agua debidamente clorada (Tolba et al., 2008).

2.2.2.- Gram Negativas

Se caracterizan por la presencia del espacio periplásmico, que es solo una capa de peptidoglicano (polímero formado por carbohidratos y aminoácidos), intercalado entre la membrana citoplasmática y la membrana externa.

Las cadenas peptídicas están parcialmente reticuladas a diferencia de las gram positivas, las cuales son altamente reticuladas.

Suelen ser bacterias patógenas, debido a que en su membrana externa contienen lipopolisacáridos los cuales son altamente tóxicos en animales, debido a que al entrar en el sistema circulatorio pueden generar consecuencias perjudiciales en los órganos y tejidos del huésped (sepsis).

Son menos susceptibles a los antibióticos ya que poseen su membrana externa y esta les proporciona protección contra los tratamientos que generalmente atacan a la membrana interna.

Las cepas que presentan resistencia a los antibióticos generalmente tienen modificaciones en la composición lipídica o proteica de la membrana externa.

2.2.2.1.- *Escherichia coli*

Se tiene pronosticado que en 2025 60% de la población tenga problemas relacionados con la escasez de agua, sin embargo, inclusive le día de hoy no todo mundo cuenta con el recurso del agua potable, debido a que el agua contiene contaminantes y patógenos que son transmitidos por medio de su consumo. Las heces de humanos y animales son la principal fuente de coliformes y otras bacterias patógenas, las cuales pueden llegar a ser un grave problema de salud pública. Las plantas de tratamiento son consideradas como una de los principales focos de infección por este tipo de contaminantes (US-EPA 2005, Ye & Zhang 2011, Novo et al. 2013). La ingesta de agua contaminada por agentes patógenos es la principal causa de enfermedades gastrointestinales que afectan a las poblaciones más vulnerables. En México las infecciones diarreicas se encuentran entre los primeros puestos de mortalidad/morbilidad en niños menores de 5 años y son responsables del 7.4% de la demanda en consulta de salud y cerca del 10% de hospitalizaciones en niños (Franzolin et al. 2005). Entre los patógenos responsables de las infecciones gastrointestinales transmitidos por agua, encontramos frecuentemente a *Escherichia coli*, la cual cuenta con cepas consideradas un problema ambiental y de salud pública en todo el mundo (Sidhu & Toze 2009). Dentro de estos tipos encontramos a las siguientes cepas: enteropatógena (EPEC), enterotoxigénica (ETEC), enteroinvasiva (EIEC), enteroagregativa (EAEC), enterohemorrágica (EHEC) y de adherencia difusa (DAEC) (Nataro & Kaper 1998, Weintraub 2007). Dentro de estos tipos la que causa más interés al menos en México es la enterotoxigénica debido a que ocasiona diarrea a niños y adultos (Shaheen et al. 2004). Se estima que en México se ha aislado este tipo en el 70% de brotes epidémicos aunado a las condiciones precarias de salud e higiene. La presencia de cepas de *E. coli* se agrava ya que muchas de ellas evolucionaron generando resistencia a un gran número de antibióticos.

El uso desmedido de antibióticos ha causado que se liberen al medio acuático llegando a plantas de tratamiento, generando bacterias resistentes (Davies &

Davies 2010). Diversos estudios demuestran que las concentraciones subinhibitorias de antibióticos liberadas en ambientes acuáticos (Kümmerer 2009a, b) promueven la resistencia bacteriana (Gullberg et al. 2011, Chow et al. 2015).

2.2.2.2.- *Salmonella Typhimurium*

La salmonella está relacionada mundialmente con enfermedades diarreicas, las cuales son las causas de la muerte de cientos de lactantes, niños y ancianos. Se estima que en Asia, África y Latinoamérica la probabilidad de mortandad en un menor de 7 años por infecciones gastrointestinales es de un 50% (Mead 1999).

La salmonelosis es una infección transmitida a través de los alimentos, provocando infecciones a cientos de personas, aunque puede ser causada por cualquiera de los serotipos, los que se encuentran aislados en mayor frecuencia en México son *Salmonella enteritidis* y *Salmonella typhimurium* (Gutiérrez-Cogco et al., 2000). Es una enfermedad estacional presentando su auge entre mayo y agosto, iniciando su declive en septiembre (Chalker & Blaser, 1988; Blaser & Newman, 1982).

La salmonelosis causada por el serotipo *Salmonella entérica* causa infecciones intestinales agudas en todas las personas, pudiendo generar a su vez enfermedades como la bacteremia y meningitis (Goldberg & Rubin, 1988). En Estados Unidos y el Reino Unido se estima que al año tienen entre 80,000 y 1,500,000 casos de infección relacionados con la cepa *Salmonella typhi* (Mead 1999; de Jong & Ekdahl, 2006), y se cree que este patógeno es el responsable de al menos el 30% de las muertes relacionadas con infecciones transmitidas por alimentos. Los científicos creen que los pollos, cerdos y bovinos son los responsables de la transmisión de este patógeno a través de la ingesta de alimentos (Savage, 1995; Sarwari et al., 2001).

Una forma particular de infección de salmonelosis es la fiebre tifoidea provocada por el serotipo *S. typha* (Everest et al., 2001). Los otros serotipos usualmente generan gastroenteritis. En México se reportan cerca de 15,000 casos al año de

fiebre tifoidea, dicha fiebre causa alrededor de 600,000 por año en todo el mundo (Valdespino-Gomez et al., 1994).

Durante 2003 a 2005 la Dra. Zaidi y sus colaboradores recolectaron cerca de 3,000 muestras de pacientes con diarrea, cerca de 6,000 de diversas carnes entre ellas, pollo, cerdo y bovino en rastros, los resultados arrojaron que los dos serotipos más frecuentes fueron *typhimurium* (22.2%) y *enteritidis* (14.5%), la primera se encontró en los animales y sus carnes crudas, principalmente en la de cerdo, seguido del bovino y posteriormente el pollo. La segunda únicamente se encontró en pollo. Además, se encontró que los serotipos encontrados tiempo antes en niños de Yucatán eran muy parecidos a los que se aislaron en las carnes crudas (Zaidi et al., 2006).

En 2002 se encontró *S. typhimurium* resistente a 10 tipos de antibióticos, como: ampicilina, cloranfenicol, trimetoprim-sufametoxazol, aminoglucósidos, ácido nalidíxico y cefalosporinas de amplio espectro en el mismo estado de Yucatán.

2.2.2.3.- *Shigella Sonnei*

Shigella es una bacteria gram negativa, anaerobia, no forma esporas y no es móvil, pertenece a la familia *Enterobacteriaceae* y comprende principalmente cuatro tipos *S. dysenteriae*, *S. boydii*, *S. flexneri* y *S. sonnei* (Chatterjee & Raval 2019). *S. sonnei* surgió más tarde que los otros serotipos de *Shigella* y se cree que se encuentra con mayor facilidad en países desarrollados esto debido a que en países de bajos recursos se ha generado cierta inmunidad por la exposición a agua contaminada con heces fecales que contiene *Plesiomonas shigelloides* las cuales tienen un antígeno idéntico al de *S. sonnei* (Shepherd et al. 2000).

A nivel mundial *Shigella* es un patógeno humano, responsable de la shigelosis (diarrea hemorrágica) que está asociada a una elevada tasa de morbilidad y mortandad (Khalil et al. 2018; Kotloff et al. 2018). Anualmente se estima que ocurren alrededor de 212 438 muertes en todas las edades debido a infecciones

relacionadas con *Shigella*, afectando mayormente a niños menor de 5 años, teniendo alrededor de 75 millones de casos por shigelosis (Khalil et al. 2018).

Se ha descubierto que *S. sonnei* genera resistencia a los antibióticos a través de elementos genéticos móviles como los plásmidos, transposones, secuencias de inserción e islas genómicas (Muthuirulandi Sethuvel et al. 2016). Un estudio reveló que la ameba *Acanthamoebae castellanii* fagocita a *S. sonnei* protegiéndola de la cloración y el daño ambiental (Saeed et al. 2008), sin embargo, en un estudio reciente se demostró que, aunque *A. castellanii* la fagocite, está no es capaz de sobrevivir o reproducirse en el citosol de *A. castellanii* (Watson et al. 2018).

S. sonnei es responsable del 80% de infecciones por *Shigella* en países desarrollados, principalmente en Norteamérica y Europa (Gu et al. 2012). *S. sonnei* ha tenido brotes relacionados con alimentos en América y Canadá (Lee et al. 1991; Naimi et al. 2003; Kimura et al. 2004). Por ejemplo, en España, un estudio asoció las infecciones con *sonnei* con el consumo de leche y quesos (García-Fulgueiras et al. 2001) y así con muchos alimentos más como zanahorias (Gaynor et al. 2009), etc.

Una dosis de entre 1 y 100 células, genera brotes de transmisión graves de *S. sonnei*, junto con otras especies de *Shigella*, comparten reservorios y patrón de transmisión, como agua, alimentos, animales salvajes, aves, insectos y amebas (Bridle 2013). Los humanos son el huésped principal, produciendo una transmisión principalmente por vía oral-fecal. Las infecciones por *Shigella* son contagiosas y de las más infecciosas si se comparan con otros enteropatógenos (DuPont 2014). La bacteria no puede sobrevivir mucho tiempo sin un huésped para lograr su transmisión (Niyogi 2005). La contaminación del agua, alimentos, la falta de monitoreo y saneamiento contribuyen a la persistencia de la bacteria ocasionando brotes graves (Taneja & Mewara 2016).

2.3.- Funcionamiento de un reactor de microondas

La radiación por microondas se encuentra entre 1 mm y 1 m del espectro electromagnético, con unas frecuencias que oscilan entre 300, 000 MHz y 300 MHz, tiene diversas aplicaciones entre ellas la aviación, armamento nuclear, bombas, televisión, satélites, medicina, etc.

La radiación de microondas está compuesta por dos campos perpendiculares el eléctrico y el magnético. Su interacción con la materia se da a través de la conducción iónica, en la que los cambios en el campo eléctrico generan movimiento en las especies iónicas al alinearse y la rotación dipolar, en la que las moléculas polares tratan de alinearse a medida que cambia el campo eléctrico, con estas interacciones se produce un supercalentamiento en el volumen de la mezcla de reacción.

En un calentamiento convencional, el calor se transmite por conducción por las paredes del recipiente y por convección en distintas partes de la solución, a usar el microondas se produce el supercalentamiento en el volumen del material, es decir que no es necesario que el calor fluya a través del recipiente, por ello la energía se transfiere más significativamente.

En la Ilustración 1 se observa el perfil de temperaturas de una solución calentada por el método convencional y por microondas.

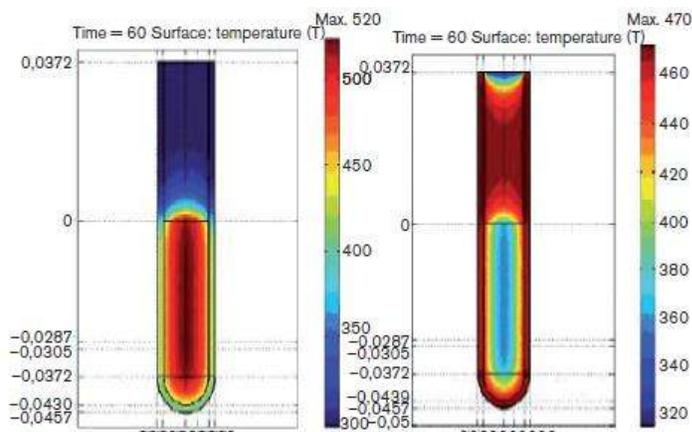


Ilustración 1. Perfil de calentamiento de una sustancia por microondas y por el método convencional

3.- Antecedentes

A continuación, se muestran los antecedentes usados para este trabajo, divididos por tres categorías, síntesis de materiales, por dopaje y por aplicación.

3.1.- Síntesis de materiales

Autor	Titulo	Síntesis	Ventajas/ Desventajas
Akhavan (2009)	O, Lasting antibacterial activities of Ag–TiO ₂ /Ag/a-TiO ₂ nanocomposite thin film photocatalysts under solar light irradiation.	Se preparó añadiendo gota a gota TiCl ₄ al etanol junto con agua desionizada, y AgNO ₃ , con agitación constante. La solución de AgNO ₃ se agregó durante 5 min, se limpió con agua desionizada y metanol por 2h de irradiación UV. Al final se calentó a 100 C durante 1 h para convertir los iones de Ag en metal de Ag.	Los tiempos de síntesis son cortos, los reactivos son baratos y no se necesita de equipo especial para la síntesis. La desventaja es que la película presenta poca duración y por ende no se puede reutilizar más veces.
Shenglin Mei, Huaiyu Wang, Wei Wang, Liping Tong, Haobo Pan, Changshun Ruan, Qianli Ma, Mengyuan Liu, Huiling Yan et-al. (2014)	Antibacterial effects and biocompatibility of titanium surfaces with graded silver incorporation in titania nanotubes.	Las placas de Ti puro comercial (10 mm 10 mm 1 mm) se pulieron y limpiaron ultrasónicamente en acetona, etanol y agua desionizada. La plata se agregó por anodización a diferentes voltajes.	La ventaja que se presenta es que se ahorrara el tiempo de síntesis del dióxido de titanio, los reactivos no son costosos, la concentración de plata se puede manipular fácilmente y su eficiencia es buena.
M.R. Espino-Estévez, Cristina Fernández-	Effect of TiO ₂ –Pd and TiO ₂ –Ag on the	El material TiO ₂ /Ag/Pd, fue sintetizado	El tiempo de síntesis es largo, no requiere de equipo

Rodríguez, Oscar M. González-Díaz, J. Araña, J.P. Espinós, J.A. Ortega-Méndez, José M. Doña-Rodríguez. (2016)	photocatalytic oxidation of diclofenac, isoproturon and phenol	mediante el método sol gel, a partir de $Ti(OBu)_4$ y por deposición se agregó plata. Todo la síntesis tardo alrededor de 6 h.	especializado, los materiales están disponibles y no son de costo elevado.
Moongraksathum Benjawan, Chen Yu-Wen. (2018)	Anatase TiO_2 co-doped with silver and ceria for antibacterial application	El material TiO_2 co-dopado con Ag y CeO_2 se sintetizó mediante el método sol gel, a partir de $TiCl_4$ y fue dopado con $AgNO_3$ y CeO_2 .	El tiempo de síntesis es de aproximadamente 8 h, necesita de temperaturas cercanas a los $0^\circ C$, la ventaja que presenta es que no requiere ningún equipo especializado.
Nigussie Gebretinsae Yeabyo, Tesfamariam Gebrekidan Mebrahtu, Tegegne Berhanu Menasbo, Weldemichel Yemane Araya, Gebreab Tesfakiros Woldu, Gebrehiwot Desta Gebremedhin, Gebremichel Gebru Equar. (2018)	Antibacterial Activity of Ag-Doped TiO_2 and Ag-Doped ZnO Nanoparticles	Los materiales TiO_2/Ag y ZnO/Ag , fueron sintetizados mediante el método sol gel, utilizando como precursor del TiO_2 , $TiCl_4$ y como precursor del ZnO , se utilizó $ZnNO_3$, en ambos casos se utilizó $AgNO_3$.	La síntesis requiere tiempos largos de reacción cercanos a las 15 h, lo cual influye en un gran gasto energético, la ventaja que presenta es que no requiere ningún equipo especializado.

3.2.- Dopaje con diferentes metales

Autor	Artículo	Dopaje	Síntesis	Conclusiones
Behnajady Mohammad A., Eskandarloo Hamed. (2013)	Characterization and Photocatalytic Activity of Ag-Cu/TiO ₂ Nanoparticles Prepared by Sol-Gel Method	Ag-Cu/TiO ₂	Se sintetizó mediante el método sol gel, después con ayuda de un baño ultrasónico se agregaron Cu(NO ₃) ₂ y AgNO ₃ como precursores	El bidopaje de Cu y Ag impide la transformación de anatasa a rutilo, se observa que con las concentraciones 0.08 % mol de Ag y 0.01% mol de Cu se tiene una mejor actividad fotocatalítica, así como, en el rango de calcinación entre 350 y 650 °C.
Julia Kennedy, Wilm Jones, David J. Morgan, Michael Bowker, Li Lu, Christopher J. Kiely, Peter P. Wells & Nikolaos Dimitratos. (2014)	Photocatalytic hydrogen production by reforming of methanol using Au/ TiO ₂ , Ag/ TiO ₂ and Au-Ag/ TiO ₂ catalysts	Au-Ag/TiO ₂	Se sintetizó mediante sol-gel a partir AgNO ₃ y se mezcló con TiO ₂ , se agito y se dejó reposar toda la noche, posteriormente se calcino a 200 C durante 24 h	Se sintetizaron tres materiales diferentes, nos enfocaremos en el bimetalico: Au-Ag/TiO ₂ , que tuvo dos síntesis distintas, se observó que su actividad fotocatalítica no obtuvo el efecto esperado dependiendo de la adición del metal, por lo cual se concluye que el orden de la adición y reducción del metal es significativo para la preparación de fotocatalizadores activos y para

				mejorar su efectividad.
Mohammad Reza Elahifarda & Reza Vatan Meidanshabib. (2017)	Photo-deposition of Ag metal particles on Ni-doped TiO ₂ for photocatalytic application	Ni-Ag/TiO ₂	Por coprecipitación se dopo el TiO ₂ con Ni(NO ₃) ₂ y AgNO ₃ , mientras la solución se agitaba magnéticamente, se irradiaba bajo luz UV durante 1 h para obtener las especies Ag ⁰ depositadas en los catalizadores.	Tanto el Ni como la Ag, aumentan la respuesta del TiO ₂ a una longitud de onda más larga, proporcionando actividad fotocatalítica. Por lo cual podemos concluir que el acoplamiento de dos aditivos, es decir, el Ni y el Ag pueden activar el TiO ₂ en condiciones luz visible con una alta eficiencia, tanto en sus fases anatasa como rutilo.
Busiakiewicz Adam, Kisielewska Aneta, Piwoński Ireneusz, Batory Damian.(2017)	The effect of Fe segregation on the photocatalytic growth of Ag nanoparticles on rutile TiO ₂ (001)	TiO ₂ /Fe- Ag	Se utilizó TiO ₂ en fase rutilo comercial, el cual llevo a cabo un proceso de pulido, y donde posteriormente se agregó por deposición térmica Fe y Ag a 1000 K por 30 minutos en un TiO ₂ previamente desgasificado.	El método de agregación de la Ag y el Fe permitió controlar de mejor manera las cantidades de este para hacer variaciones, se observó que entre el 1 y el 3 % de hierro, aumentaba el tamaño de las nanopartículas de plata, además de que el Fe aumentaba significativamente las propiedades fotocatalíticas del TiO ₂ .

Palak Bansal, Anoop Verma. (2018)	N, Ag co-doped TiO ₂ mediated modified in-situ dual process (modified photocatalysis and photo-Fenton) in fixed-mode for the degradation of Cephalexin under solar irradiations	N-Ag/TiO ₂	Se impregno TiO ₂ , con urea como precursor del nitrógeno, y AgNO ₃ como precursor de la plata.	Se observó que conforme se aumentó el porcentaje de Ag (entre el 0.1 y 1.5 %), se degradó mayor cantidad de cefalexina, después de esos porcentajes se comenzaron a generar acumulaciones. Con lo cual se degradó el 88% de la cefalexina después de 45 min de irradiación solar
--	--	-----------------------	---	--

3.3.- Por aplicación

Autor	Título	Aplicación
Fiorenza Roberto, Bellardita Marianna, D'Urso Luisa, Compagnini Giuseppe, Palmisano Leonardo, Scirè Salvatore. (2016)	Au/TiO ₂ -CeO ₂ Catalysts for Photocatalytic Water Splitting and VOCs Oxidation Reactions	La presencia del Ce favorece la producción de H ⁺ , así como la mineralización del propanol. No hay una diferencia significativa al probar el material en presencia de luz ultravioleta o luz visible.
R. Saravanan, Devaraj Manoj, Jiaqian Qin, Mu. Naushad, F. Gracia, Adam F. Lee, Mohammad Mansoob Khan, M. A. Gracia-Pinilla (2018)	Mechanochemical synthesis of Ag/TiO ₂ for photocatalytic Methyl Orange degradation and hydrogen production	El titanio dopado con plata superó significativamente al titanio puro tanto bajo luz visible como solar, con un blanqueo completo de MO (Naranja de metilo) logrado en sólo 80 min bajo luz solar simulada. El rendimiento superior del Ag/TiO ₂ se atribuye a la combinación de su menor

		separación de banda y sus efectos plasmónicos que permiten la recolección de energía de la luz visible, y a la mejora de la vida útil de los portadores de carga. El presente trabajo evidencia un aumento significativo de la tasa de fotodegradación de MO (98,9% en 60 minutos bajo luz ultravioleta, y 99,3% en 80 minutos bajo radiación solar, lo que corresponde a 38 $\mu\text{mol/h/gcat}$).
Pummarin Khamdahsag, Pongtanawat Khemthong, Kannika Sitthisuwannakul, Nurak Grisdanurak, Tuksadon Wutikhun, Chompoonut Rungnim, Supawadee Namuangruk, Nuttaporn Pimpha. (2018)	Insights into binding mechanism of silver/titanium dioxide composites for enhanced elemental mercury capture	Se encontró que el TiO_2 puro no tenía actividad para la captura de Hg^0 . La incorporación de plata aumentó la capacidad de captura de Hg^0 y el aumento de la carga de plata resultó en un mayor rendimiento de captura. Aunque el área de la superficie falleció con el aumento de la cantidad de plata, la capacidad de adsorción de Hg^0 se incrementó dependiendo de la cantidad de plata. Asumiendo que el aumento en la capacidad de adsorción provenía sólo del sitio de la plata.
Cano-Franco Julieth Carolina, Álvarez-Láinez Mónica. (2019)	Effect of CeO_2 content in morphology and optoelectronic properties of TiO_2 - CeO_2 nanoparticles in visible light organic degradation	La solución de azul de metileno fue degradada en un 95% en presencia de $\text{TiO}_2/\text{CeO}_2$ por radiación solar simulada transcurridos 150 min. La capacidad de absorción del TiO_2 - CeO_2

		aumenta y conduce una alta actividad fotocatalítica.
Firmino Hellen C.T., Nascimento Emanuel P., Bonan Roberta F., Maciel Panmella P., Castellano Lucio R.C., Neves Gelmires A., Menezes Romualdo R. (2020)	Antifungal activity of TiO ₂ -CeO ₂ nanofibers against <i>Candida</i> fungi	Las nanofibras de TiO ₂ -CeO ₂ dificultaron significativamente el crecimiento de los hongos <i>C. albicans</i> , <i>C. glabrata</i> y <i>C. krusei</i> en comparación con el TiO ₂ puro con el que también se realizaron pruebas, con una concentración del 50% en vol. De CeO ₂ se obtuvieron los mejores resultados.

4.- Justificación

Día a día aumentan los casos de enfermedades causadas por diversos virus y bacterias, resistentes a los antibióticos. La plata ofrece una acción efectiva, libre de la resistencia bacteriana.

Diversos estudios muestran la eficacia antimicrobiana de las nanopartículas de plata frente a diversos virus y bacterias. Además, al soportarse en materiales con superficies mesoporosas tales como el óxido de titanio, permiten que su recuperación sea posible evitando, gastos innecesarios.

5.- Hipótesis

Las nanopartículas de plata tienen propiedades bactericidas. Estas nanopartículas soportadas en Ti_{1-x}Ce_xO₂ inhibirán la presencia y crecimiento de las bacterias gram-negativas *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Shigella sonnei* y gram positiva *Staphylococcus aureus*.

6.- Objetivos

6.1.- General

Evaluar las propiedades bactericidas del compuesto nano estructurado Ag/ Ti_{1-x}Ce_xO₂, en presencia de las bacterias gram-negativa *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Shigella sonnei* y gram positiva *Staphylococcus aureus*.

6.2.- Específico

- ✚ Sintetizar materiales mesoporosos de Ag/Ti_{1-x}Ce_xO₂ mediante la técnica sol-gel asistida por microondas.
- ✚ Establecer una relación óptima de plata dispersa en el soporte mixto Ag/Ti_{1-x}Ce_xO₂
- ✚ Caracterizar las nanoestructuras para determinar sus propiedades morfológicas y químicas para relacionarlas con sus propiedades bactericidas.
- ✚ Estudiar el efecto bactericida de los compuestos Ag/Ti_{1-x}Ce_xO₂ en presencia de Luz visible, presencia de luz UV y ausencia de luz.

7.- Metodología

7.1.- Síntesis del material

7.1.1.- Reactivos

- ✚ Butóxido de titanio (Sigma Aldrich >97%)
- ✚ Nitrato cerico amónico (Sigma Aldrich > 99%)
- ✚ Alcohol etílico grado industrial 96%
- ✚ Agua desionizada

7.1.2.- Disolución de sal precursora de cerio

Las cantidades correspondientes al 2 y 4% molar de la sal precursora de cerio se disolvieron en 72 ml de agua desionizada a temperatura ambiente y agitación moderada. Para 3 g de $Ti_{1-x}Ce_xO_2$, se utilizaron las siguientes cantidades:

% mol Ce-TiO ₂	M de sal precursora
TiO₂ puro	-
0.02	4×10^{-10}
0.04	8×10^{-10}

Tabla 1. Cantidad de sal precursora dopante

7.1.3.- Síntesis en reactor de microondas

Se sintetizó en un reactor Anton Para Syntos 3000, el cual requiere viales de plástico, utilizando las cantidades de reactivos, en estricto orden consecutivo.

Se mezcló etanol, butóxido de titanio, agua desionizada y la solución de sal precursora del cerio, para los 3 g de $Ti_{1-x}Ce_xO_2$.

7.1.4.- Condiciones de operación

Una vez obtenida la mezcla anterior se distribuyó en los cuatro viales del microondas, se introdujeron al reactor el cual se programó bajo las siguientes condiciones.

- ✚ T máx de operación: 180 ° C
- ✚ Tiempo de reacción: 2 min
- ✚ Rampa: 10 min



Ilustración 2. Reactor de microondas Anton Paar Synthos 3000

Al término de la síntesis (37 min aproximadamente), el contenido de cada vial fue depositado en un matraz Erlenmeyer (Villicaaa-MMndez, 2017).

7.1.5.- Secado y molienda del producto

El matraz Erlenmeyer anteriormente mencionado se introdujo en la estufa a 100 ° C por 24 h, para favorecer la evaporación del etanol y agua, el producto se molió y tamizo para someterse a calcinación.

7.1.6.- Tratamiento térmico (calcinación)

Se calcinó la muestra a 550 ° C durante 1 h y 30 min para asegurar que el TiO₂ presentará mayor cristalinidad. Todas las muestras fueron tamizadas hasta obtener un diámetro de partícula de 74 µm (malla 200) y se enviaron a una caracterización previa.

7.1.7.- Método de impregnación húmeda incipiente

Se realizó una solución con nitrato de plata AgNO₃ en agua en agitación constante. Se colocó el polvo de Ti_{1x}Ce_xO₂ e impregnó gota a gota con la solución del AgNO₃, agitando y sin dejar secar la muestra. Se secó el polvo de Ag/Ti_{1x}Ce_xO₂ durante 2 h a 200°C, maceró y redujo con hidrogeno por 3 h a 400°C. (Mondragón, Palomino y Rojas, 2021).



Ilustración 3. Impregnación húmeda incipiente

Posteriormente se molió y tamizó de nuevo hasta obtener un tamaño homogéneo de partícula de $74\ \mu\text{m}$ (malla 200).

7.2.- Caracterización del material

Para encontrar las características del material se llevaron a cabo diversas pruebas, para determinar las fases, estructura cristalina, área superficial, tamaño de poro, composición y escaneo superficial.

7.2.1.- Difracción de rayos X

Es una prueba ampliamente conocida para encontrar las fases y estructuras cristalinas de un material. Un difractograma de rayos X nos muestra información cualitativa y cuantitativa de las fases cristalinas presentes en un sólido, así como el sistema cristalino del que forma parte, índices de Miller, parámetros de red, tamaño de cristal, etc., siempre y cuando el material posea una estructura cristalina. Las estructuras cristalinas poseen planos que son capaces de difractar rayos X. Su fundamento se basa en la ley de Bragg.

Para esta caracterización se utilizó el equipo de rayos X marca SIEMENS modelo D-500 usando un ánodo de cobre con radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54\ \text{nm}$), que se muestra en la Ilustración 4.



Ilustración 4. Difractómetro de rayos X SIEMENS modelo D-500 usando un ánodo de cobre con radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54 \text{ nm}$)

Para el análisis se molieron los polvos y tamizaron a un tamaño inferior a $74\mu\text{m}$ (malla 200); se colocó en el porta muestras y se incidió el haz de luz con las siguientes condiciones: paso $0.6^\circ\theta$ en un intervalo de $10\text{-}80^\circ$, a 40 KeV y una corriente de 30 mA .

7.2.2.- Determinación de área superficial (BET)

La fisisorción de nitrógeno es una técnica de caracterización que, mediante la adsorción de un gas en la superficie de un sólido, determina el área superficial del material, así como el tamaño de poro, determinando la cantidad de nitrógeno adsorbido en equilibrio en su punto de ebullición a una presión menor a la presión de vapor. El material se coloca en el portamuestra, se introduce en un recipiente con una cantidad conocida de nitrógeno y se deja correr hasta alcanzar el equilibrio, gracias a la diferencia en la cantidad de gas se cuantifica el gas adsorbido y se repite el mismo proceso a diferentes presiones todo a cierta temperatura. Con dichos datos obtenemos la isoterma de absorción, y con ella podemos determinar el tamaño de poro que presenta nuestro material.

7.2.3.- Espectroscopia IR

La espectroscopia IR se basa en el hecho de que la mayoría de las moléculas absorben luz en el espectro infrarrojo, convirtiéndola en vibraciones. Es característica de la naturaleza de los componentes que se encuentran en una muestra. Se mide como una longitud de onda y su resultado sirve como una “huella dactilar” de moléculas orgánicas e inorgánicas.

7.2.4.-Microscopia electrónica de barrido

La microscopia electrónica de barrido es una técnica que nos permite obtener información puntual de una muestra. En un microscopio electrónico de barrido un haz pasa por las lentes condensadora y objetivos, se realiza un barrido a lo largo de la muestra, mientras el detector cuantifica el número de electrones secundarios de baja energía emitidos en toda la superficie de la muestra, obteniendo así la morfología y topografía de la superficie de la muestra.



Ilustración 5. Microscopio electrónico de barrido

7.3.- Cepas bacterianas

Se utilizaron las cepas *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028), *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Shigella sonnei* (ATCC 9290) y *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923) con número de cepas americanas (American Type Culture Collection). Las cepas fueron proporcionadas por el laboratorio estatal de salud pública de Michoacán. Se hicieron crecer en caldo nutritivo durante 24 h a 37°C y se resembraron cada 24 h por 3 días, con el fin de mantener la viabilidad.

7.3.1.- Preparación de caldos de cultivo

Se utilizó caldo nutritivo, se preparó siguiendo las indicaciones del fabricante.

Después de una esterilización previa en la autoclave, se dejó enfriar a temperatura ambiente, de forma estéril, bajo campana con flujo laminar. Se agregaron 10 mL de caldo en un tubo de ensaye con tapa rosca en condiciones antisépticas.

7.3.2.- Cultivo de cepas bacterianas

Los agares soya tripticaseína y MacConkey, se prepararon según las indicaciones del fabricante. Después de esterilizarse, se dejaron enfriar, en un medio estéril bajo campana de flujo laminar con luz ultravioleta. Se vierten 10 ml de los preparados en cajas Petri, con un espesor uniforme de 5 mm. Las placas se dejan solidificar a temperatura ambiente, evitando la acumulación de gotas de condensación en la tapa. Se guardan en plástico para aumentar su tiempo de vida en un refrigerador a 4°C.

7.3.3.- Método de determinación de sensibilidad antimicrobiana por dilución

7.3.3.1 Turbidez estándar para la preparación del inóculo

Las pruebas de turbidez se realizaron basándose en el método de McFarland, se midió la absorbancia a 600 nm en el espectrofotómetro UV-Vis VELAB VE-5600UV, donde se estandarizó a 7×10^7 CFU/mL.

7.3.3.2 Determinación de la concentración mínima bactericida

Para evaluar la actividad bactericida de los materiales se utilizó la técnica de ensayo de dilución en caldo nutritivo, lo cual proporcionara información preliminar, acerca del material y su eficacia bactericida. Las pruebas de dilución se llevaron a cabo de acuerdo al manual de procedimientos para la determinación de la sensibilidad a los antimicrobianos en bacterias aisladas del CLSI de 2006. La concentración inicial para los ensayos de dilución fue de 1 mg/mL.

Para la determinación de la concentración mínima inhibitoria se realizaron 10 diluciones seriadas de 1:2 del material con el caldo, en tubos previamente esterilizados. Se emplearon dos controles, el control positivo (caldo nutritivo más bacteria) y el control negativo (únicamente caldo nutritivo).

A los tubos 1 a 9 se les agregaron 250 μ L de caldo bacteriano, al tubo 10 y al control positivo se les agregaron 500 μ L de caldo bacteriano, los tubos se incubaron por 24 h a 37°C para garantizar el crecimiento bacteriano. Después de 24 h se observó la turbidez y se sembró para corroborar la presencia o ausencia de carga bacteriana.

La CMI fue interpretada como la concentración de antimicrobiano contenida en el tubo de la serie que inhiba el crecimiento visible de la bacteria.

Para determinar la CMB se tomaron muestras de cada uno de los tubos y se sembraron en cajas Petri con medio selectivo (agar MacConkey y Soya tripticaseína), se incubaron durante 24 h a 37°C. Después de 24 h se observó si hubo o no presencia de carga bacteriana.

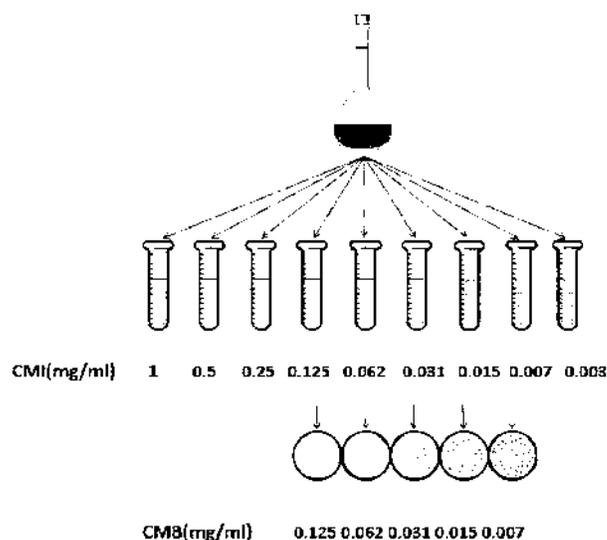


Ilustración 6. Diagrama de diluciones para estimación de CMI y CMB

7.3.3.3 Crecimiento bacteriano en presencia de los materiales

Se determinó el crecimiento de las bacterias en presencia de los materiales impuestos como biocidas. Para ello se valoró la capacidad bactericida a diferentes tiempos y la CMB.

Se tomaron 10 mL de caldo nutritivo, colocados en un tubo con tapa rosca previamente inoculado, al cual se le agregó la CMB del material bactericida, se expuso el material durante 1 h a luz visible o luz UV excepto en caso de las pruebas en ausencia de luz. Después de 1 h se agregó una concentración conocida de caldo bacteriano en CFU/mL.

Se tomaron muestras para sembrar a diferentes tiempos (0, 5, 15, 30, 45, 60, 90 y 120 min), en ausencia, presencia de luz visible y presencia de luz UV, la muestra se colocó en cajas Petri donde se usó la técnica de estriado en placas, con agar selectivo, se incubaron a 37°C por 24 h para después realizar el conteo de colonias.

Como control se sembró una muestra de caldo bacteriano en ausencia del material biocida, la cual también se incubó a 37°C por 24 h.

8.- Análisis de resultados

8.1.- Síntesis de materiales

8.1.1.- Material TiO₂ puro

8.1.1.1.- Difracción de rayos X

En la Ilustración 7 se observan dos picos característicos se encuentran entre 25.3 y 25.6 θ el cual corresponde a la fase anatasa. Así mismo no presenta ninguna de las fases brookita o rutilo, únicamente presenta un ensanchamiento de pico amplio el cual abarca desde $2\theta = 23$ hasta $2\theta = 29$. Diversos autores coinciden en que la formación de la fase rutilo inicia a los 500°C (Allen et al., 2018; Yu et al., 2009) para el TiO₂ puro, la temperatura de calcinación de este material fue de 500°C, el pico característico de la fase rutilo se encuentra alrededor de $2\theta = 27.5$, al no encontrar este pico en el difractograma se puede concluir que no hay presencia de la fase rutilo, o esta se encuentra en un porcentaje menor al 1% de peso de la muestra (de acuerdo a la sensibilidad del equipo).

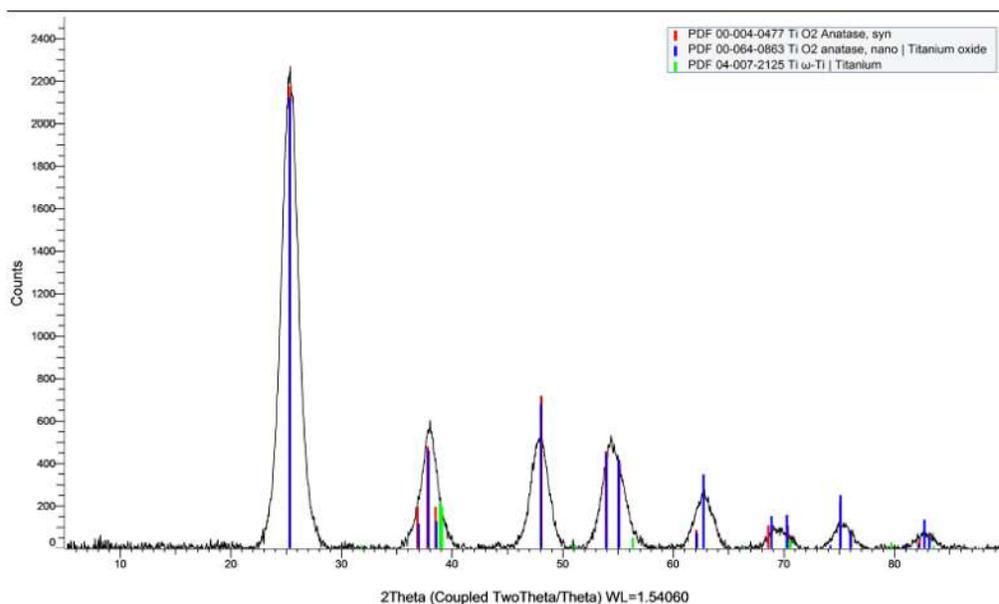


Ilustración 7. Difractograma TiO₂ puro

A partir de la difracción de rayos X es posible obtener el tamaño de cristal o partícula, utilizando la ecuación de Scherrer:

$$\beta = \frac{K\lambda}{FWHMCos\theta}$$

β es el tamaño promedio del cristal o partícula, K es una constante (0.89), λ es la longitud de onda de los rayos X empleados, FWHM es el ancho a la altura media del pico representativo en radianes y θ es el ángulo en grados sexagesimales.

De acuerdo a los datos presentados el pico representativo se encuentra en $\theta=25.6$, y el factor FWHM es igual a 0.197, con estos datos se obtuvo un tamaño de cristal de 43.1 nm.

La ley de Bragg sirve para encontrar la distancia interplanar:

$$n\lambda = 2 d \text{ Sen}\theta$$

Donde n es un número entero, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es la distancia interplanar y θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

De acuerdo a los datos $\theta=25.6$, y $n=1$, la distancia interplanar es de 0.3477 nm.

8.1.1.2.- Determinación del área superficial (BET)

El TiO_2 puro presento los siguientes resultados, contenidos en la Tabla 2:

Área superficial	130.99 m ² /g
Diámetro de poro	5.68 nm
Volumen de poro	0.236 cm ³ /g

Tabla 2. Determinación de área superficial para TiO_2 .

Con los datos obtenidos se concluye que el TiO_2 podría ser un material mesoporoso, debido a que se encuentra con un tamaño de poro de 5.68 nm y de acuerdo con la IUPAC un material mesoporoso es aquel que se encuentra con un diámetro de poro entre 2 y 50 nm.

8.1.2.- Material $Ti_{1-x}Ce_xO_2$ 2% Ce, 3 % Ag

8.1.2.1.- Difracción de rayos X

En la Ilustración 8 se observa el difractograma correspondiente al material $Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$, antes de la impregnación con plata, se observa que el pico característico se encuentra en 25.2, que de acuerdo con la literatura corresponde a la fase anatasa, no se observa la presencia de las fases brookita ni rutilo, a pesar de haberse sometido a una calcinación de 550°C durante 1 h 30 min, por lo cual se puede concluir que la presencia de cerio como agente dopante favorece la formación de la fase anatasa. Así mismo, se observa un alargamiento del pico característico y una disminución en el ensanchamiento de la base (es decir se encuentra más definido en comparación con los picos principales del TiO_2 puro), lo cual evidencia un cambio en el tamaño de cristal.

El tamaño de cristal se calculó utilizando la ecuación de Scherrer, la cual con los datos $\theta=25.195$ y $FWHM= 0.256$, arrojó un tamaño de cristal de 32.8 nm, el cual disminuyó considerablemente en comparación del tamaño de partícula del TiO_2 puro, además de presentar una distancia interplanar de 0.35 nm.

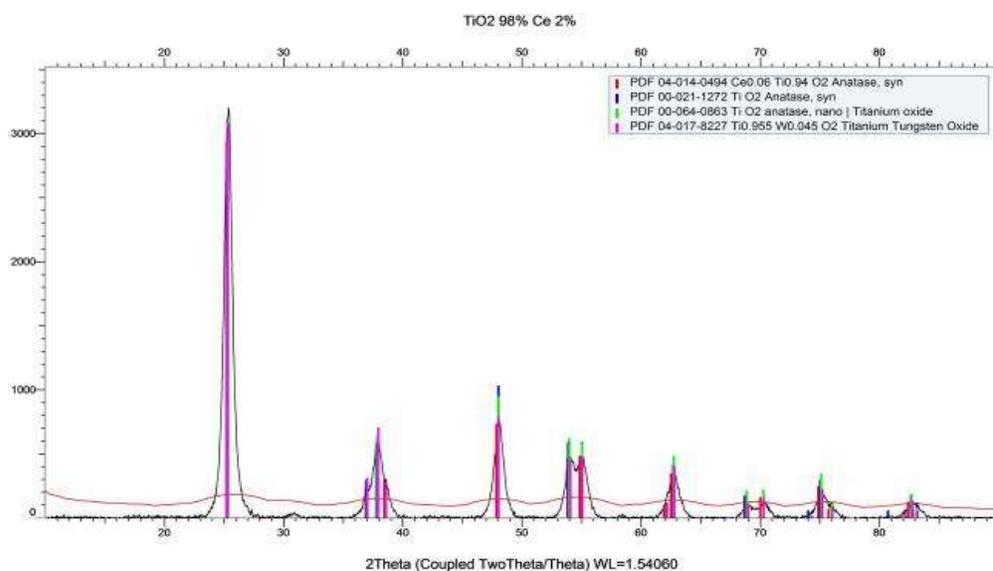


Ilustración 8. Difractograma del material $Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$

En la Ilustración 9 se observa la material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, la adición de la plata no afecta la actividad fotocatalítica aparentemente, pues se sigue observando únicamente la presencia de la fase anatasa, pero de nuevo hay un alargamiento del pico principal del TiO_2 , además de la reducción en la base de el mismo pico ubicado en $2\theta=25.2$, esto afecta claramente en el tamaño de cristal, sin embargo, no favorece la presencia ni de brookita, ni de rutilo. Probablemente se originaron estos cambios debido a que después de impregnarle la plata el material fue reducido con hidrogeno a 400°C durante 4h. El TiO_2 con los siguientes valores $\theta=25.222$ y $\text{FWHM}= 0.312$, presenta un tamaño de cristal de 26.8 nm, disminuyendo considerablemente en comparación del tamaño de cristal del material sin la adición de la plata.

La plata se encuentra en un rango de $2\theta= 38$, presentando dos picos característicos pertenecientes a Ag_2O y a la plata en una aleación con titanio, de dichos picos se obtienen los siguientes valores $\theta=38.158$, $\text{FWHM}= 0.144$ y $\theta=37.795$, $\text{FWHM}= 0.432$, de los cuales obtenemos un tamaño de cristal promedio de 40.8 nm.

Y con $2\theta= 38$ y $n=1$, la distancia interplanar es de 0.3528 nm.

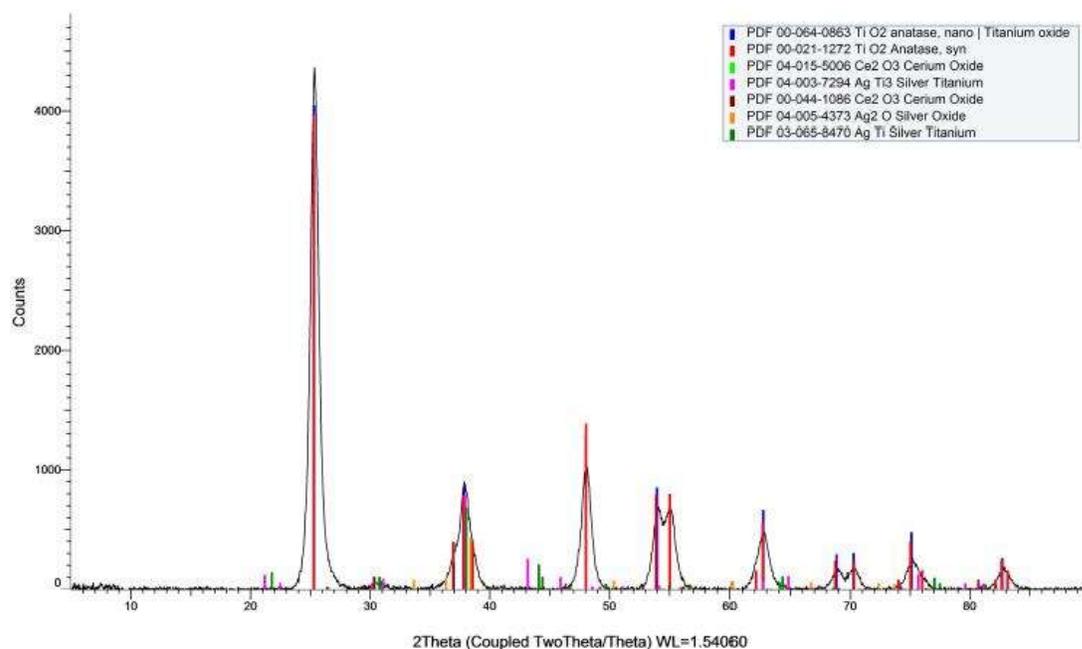


Ilustración 9. Difractograma del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$

8.1.2.2.- Determinación de área superficial

Para el material $Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$ y $Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$ se obtuvieron los siguientes resultados respecto al área superficial, contenidos en la Tabla 3:

Material	Área superficial	Diámetro de poro	Volumen de poro
$Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$	178.77	9.55	0.427
$Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$	177.31	8.53	0.378

Tabla 3. Determinación de área superficial para materiales $Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$ y $Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$

Se observa un incremento considerable en el área superficial procedente de la impurificación con cerio, incrementa tanto el área superficial, como el diámetro y volumen de poro en hasta un 30% en comparación con el TiO_2 puro, sin embargo, se observa que al impregnar la plata disminuyen muy ligeramente los parámetros, debido a que la plata puede estar obstaculizando los poros del material y por ello afectar su porosidad, sin embargo ambos materiales podrían pertenecer al grupo de los mesoporosos (entre 2 y 50 nm) de acuerdo a la clasificación de la IUPAC.

8.1.2.3.- Microscopia electrónica de barrido

A continuación, se muestran las micrografías del material $Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$, las cuales presentan tamaños de partícula entre 1 y 10 μm (5000X y 10000X).

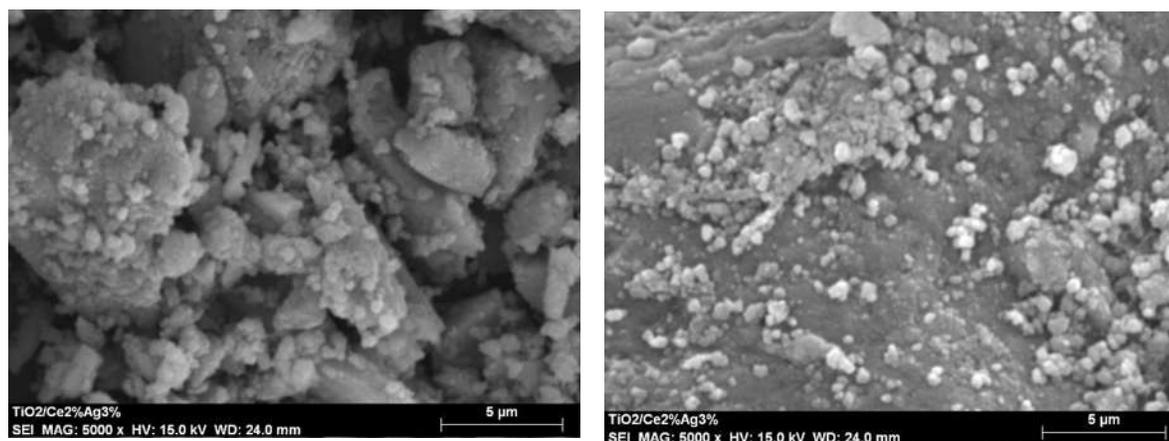


Ilustración 10. Micrografías del material $Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$ a 5000X

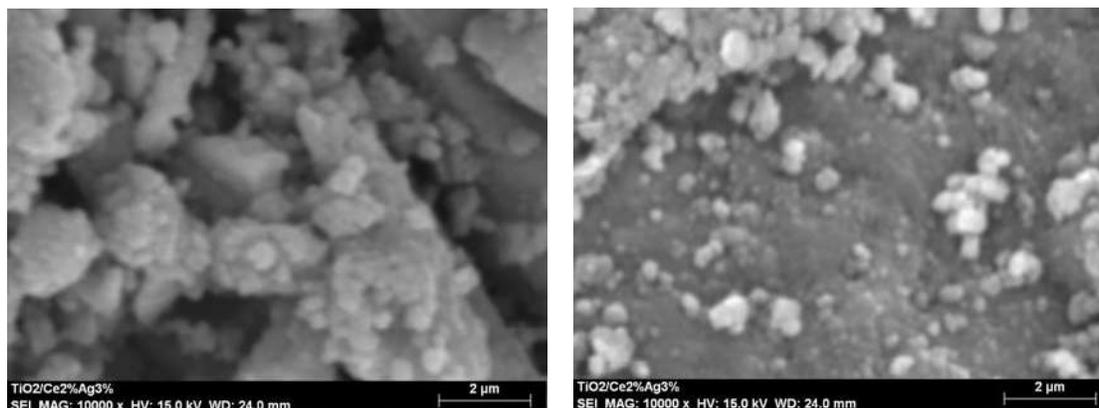


Ilustración 11. Micrografías del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ a 10000X

Como se observa en las Ilustraciones 10 y 11, la superficie es áspera, con bordes rectos y esquinas angulosas, presenta ligeras aglomeraciones, sin embargo, se observa una distribución parcialmente uniforme, respecto a la plata, se encuentra en la superficie con tamaños de partícula menores a $1\mu\text{m}$, esta tiene formas esféricas y se encuentra distribuida en toda la superficie del material.

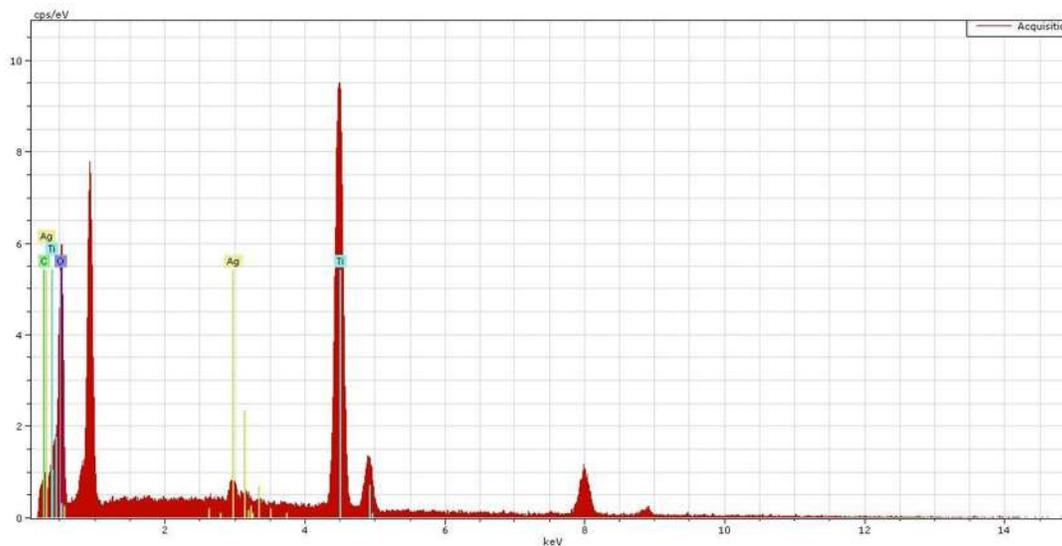


Ilustración 12. Espectroscopia de energía dispersiva del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$

El análisis EDS no muestra la presencia del Ce, debido a la sensibilidad del equipo, a continuación, se muestran los porcentajes de cada especie, en la Tabla 4.

Material Ag/Ti _{0.98} Ce _{0.02} O ₂	
Elemento	Porcentaje
Carbono	1.9939
Oxígeno	52.1612
Titanio	43.4784
Plata	2.3663

Tabla 4. Componentes en porcentaje del material Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O₂

Como se observa en la Tabla 4, el porcentaje en peso de plata es cercano al 2.4%, en este caso, la impregnación húmeda incipiente, no obtuvo el rendimiento esperado.

8.1.2.4.- Espectroscopia IR

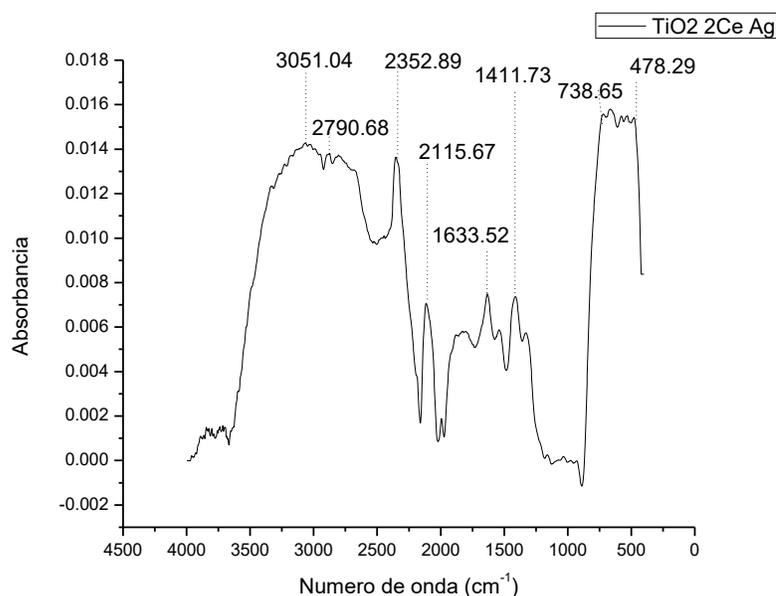


Ilustración 13. Espectrograma del material Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O₂

Para el material Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O₂, los picos que se localizan entre 3000 a 3427 cm⁻¹, son pertenecientes a los radicales hidroxilos, los que se encuentran entre 1624 a 1631 cm⁻¹, pertenecen a las moléculas de agua absorbidas. Debajo de los 1000 cm⁻¹, se atribuyen a las vibraciones de flexión Ti-O y Ti-O-Ti, los cuales presentan un ligero corrimiento, que indica la formación de enlaces Ti-O-Ce. La banda de 738 cm⁻¹

¹ pertenece a los enlaces Ti-O-Ti con una vibración acuosa, resultado de las reacciones de condensación, a los 478 cm^{-1} se encuentra una banda que indica la presencia de enlaces Ce-O debido a la presencia de óxido de cerio, con estos datos se puede concluir que efectivamente existió un dopaje del cerio y no solamente la superposición de átomos.

8.1.3.- Material $\text{Ti}_{1-x}\text{Ce}_x\text{O}_2$ 4% Ce, 3 % Ag

8.1.3.1.- Difracción de rayos X

En la Ilustración 14 se observa el difractograma del material $\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, antes de la adición de plata, en el cual se observa la presencia de la fase anatasa principalmente en $2\theta=25.4$, a pesar de que el material fue calcinado a 550°C no existe evidencia de la presencia de las fases brookita o rutilo, lo cual al igual que en el material $\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, se comprueba que la presencia del cerio como agente dopante favorece la formación de la fase anatasa. De igual manera se observa el alargamiento del pico principal, así como una disminución en el ensanchamiento de su base, lo cual de nuevo nos indica un cambio en el tamaño de cristal del material con respecto al TiO_2 y al $\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, aunque con este último aparentemente es muy parecido.

El tamaño de cristal fue obtenido a partir de los siguientes datos con la ecuación de Scherrer, $\theta=25.406$ y $\text{FWHM}= 0.512$, dando como resultado un tamaño de cristal igual a 16.2 nm , el cual disminuye drásticamente en comparación con los tamaños de cristales de los materiales anteriormente descritos, lo cual indica que a mayor concentración de cerio se restringe la cristalinidad del material, y la presencia del cerio inhibe la transformación de la fase anatasa a rutilo.

Además con $\theta= 25.406$ y $n=1$, la distancia interplanar es 0.3512 nm .

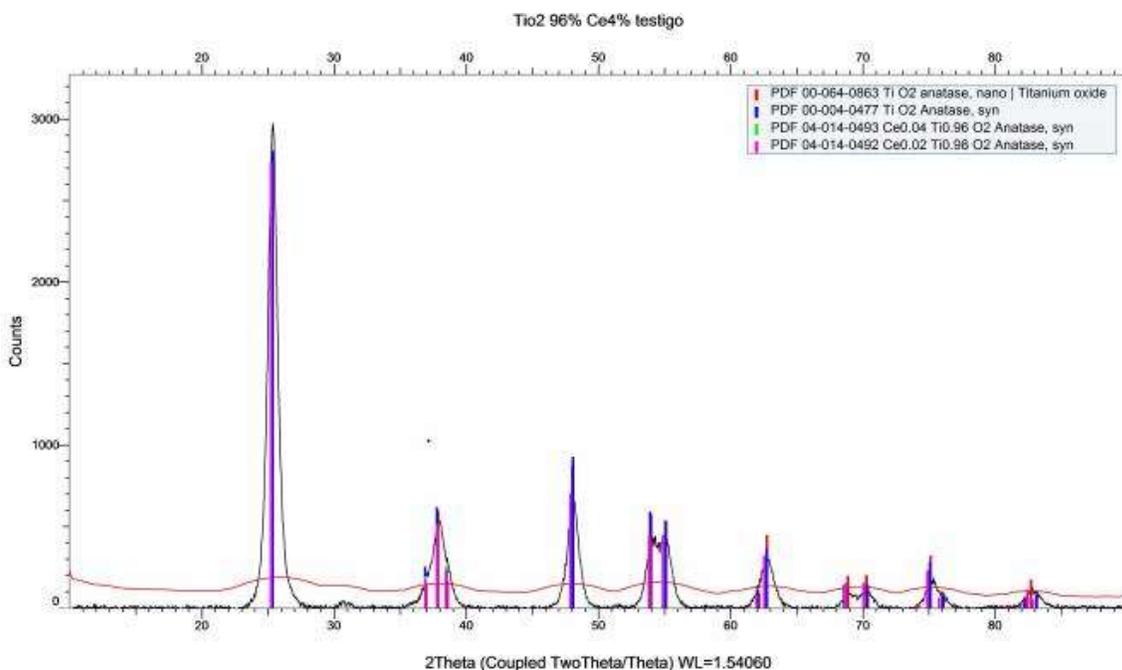


Ilustración 14. Difractograma del material $Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$

En la Ilustración 15 se observa la material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$, la adición de la plata no afecta la actividad fotocatalítica aparentemente, pues se sigue observando únicamente la presencia de la fase anatasa, pero de nuevo hay un alargamiento del pico principal del TiO_2 , además de la reducción en la base de el mismo pico ubicado en $2\theta=25.3$, esto afecta claramente en el tamaño de cristal, sin embargo, no favorece la presencia ni de brookita, ni de rutilo. Probablemente se originaron estos cambios debido a que después de impregnarle la plata el material fue reducido con hidrogeno a $400^\circ C$ durante 4h. El TiO_2 con los siguientes valores $\theta=25.352$ y $FWHM= 0.118$, presenta un tamaño de cristal de 74 nm, aumentando considerablemente en comparación del tamaño de cristal del material sin la adición de la plata.

La plata se encuentra en un rango de $2\theta= 38$, presentando dos picos característicos pertenecientes a Ag_2O y a la plata en una aleación con titanio, de dichos picos se obtienen los siguientes valores $\theta=37.790$, $FWHM= 0.336$ y $\theta=37.997$, $FWHM= 0.192$, de los cuales obtenemos un tamaño de cristal promedio de 35.65 nm, y una distancia interplanar de 0.3533 nm.

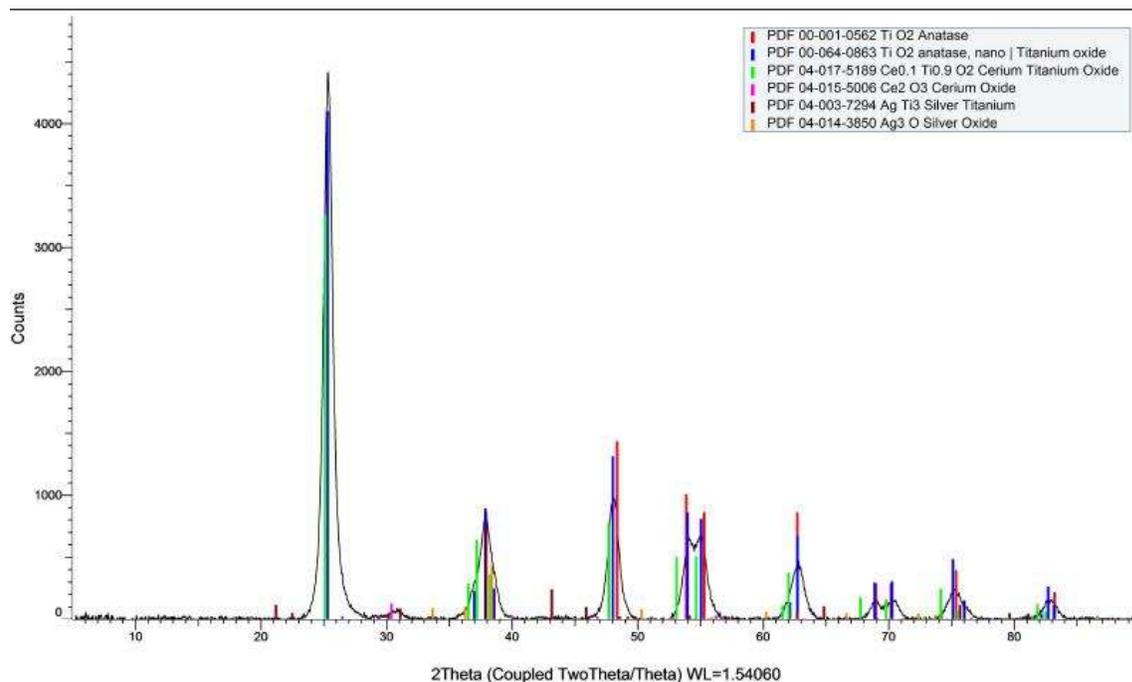


Ilustración 15. Difractograma del material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$

8.1.3.2.- Determinación del área superficial

Para el material $Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$ y $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$ se obtuvieron los siguientes resultados respecto al área superficial, contenidos en la tabla 3:

Material	Área superficial	Diámetro de poro	Volumen de poro
$Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$	183.76	10.152	0.466
$Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$	182.76	8.72	0.398

Tabla 5. Determinación de área superficial para materiales $Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$ y $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$

Se observa un incremento considerable en el área superficial procedente de la impurificación con cerio, incrementa tanto el área superficial, como el diámetro y volumen de poro en hasta un 40% en comparación con el TiO_2 puro y casi insignificante en comparación con el material $Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$, donde apenas y hay un ligero incremento del 2%, sin embargo, se observa que al impregnar la plata disminuyen muy ligeramente los parámetros, debido a que la plata puede estar obstaculizando los poros del material y por ello afectar su porosidad, sin embargo,

ambos materiales podrían pertenecer al grupo de los mesoporosos (entre 2 y 50 nm) de acuerdo a la clasificación de la IUPAC.

8.1.3.3.- Microscopia electrónica de barrido

A continuación, se muestran las micrografías del material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, donde se muestran tamaños de partícula entre 1 y 10 μm (5000x Y 10000X)

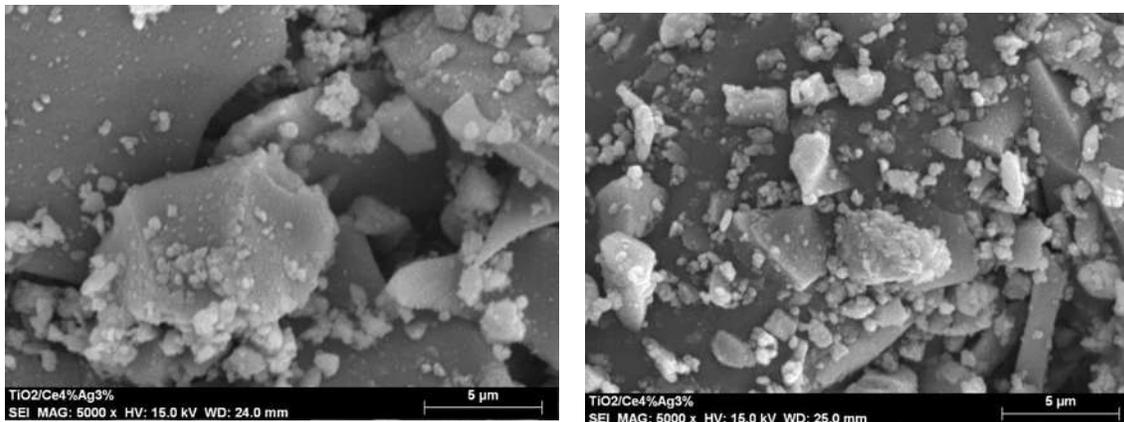


Ilustración 16.. Micrografías del material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ a 5000 X (1)

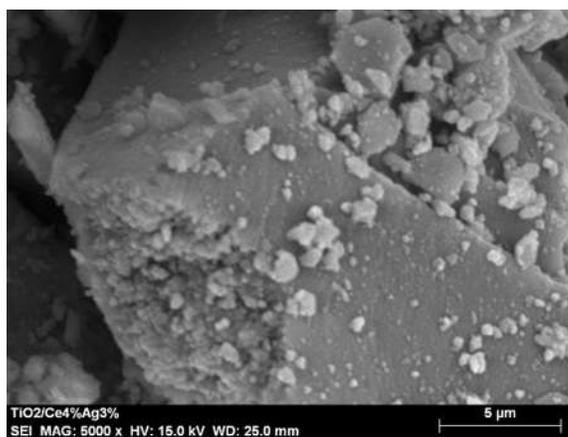


Ilustración 17. Microscopia del material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ a 5000 X (2)

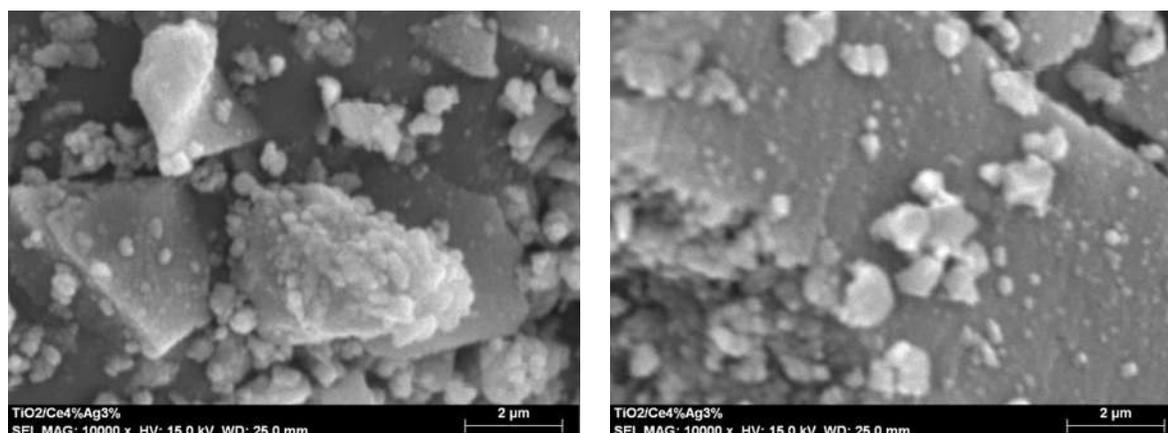


Ilustración 18. Micrografías del material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$ a 10000X

Como se observa en las Ilustraciones 16, 17 y 18, el tamaño de aglomeraciones crece, en función del cerio, ya que se percibe, una menor distribución de partículas en la superficie como en el material dopado al 2% mol de Ce, se observa que la superficie es áspera, con esquinas anguladas y bordes rectos, la plata se observa también aglomerada en la superficie del material, con tamaños de partícula menores a $1\mu m$, con formas esféricas.

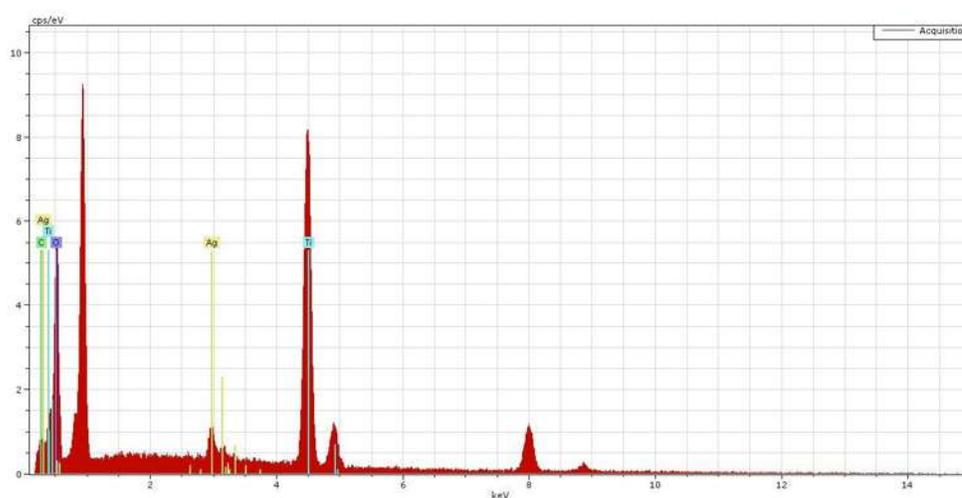


Ilustración 19. Espectroscopia de energía dispersiva del material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$

El análisis EDS no muestra la presencia del Ce, debido a la sensibilidad del equipo, a continuación, se muestran los porcentajes de cada especie, en la Tabla 6.

Material Ag/Ti _{0.96} Ce _{0.04} O ₂	
Elemento	Porcentaje
Carbono	2.9213
Oxígeno	55.0532
Titanio	39.0840
Plata	2.9413

Tabla 6. Componentes en porcentaje del material Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O₂

Como se muestra en la Tabla 6, el material contiene cerca del 3% en peso de plata, lo cual nos informa que la impregnación húmeda incipiente, brindo buenos resultados.

8.1.3.4.- Espectroscopia IR

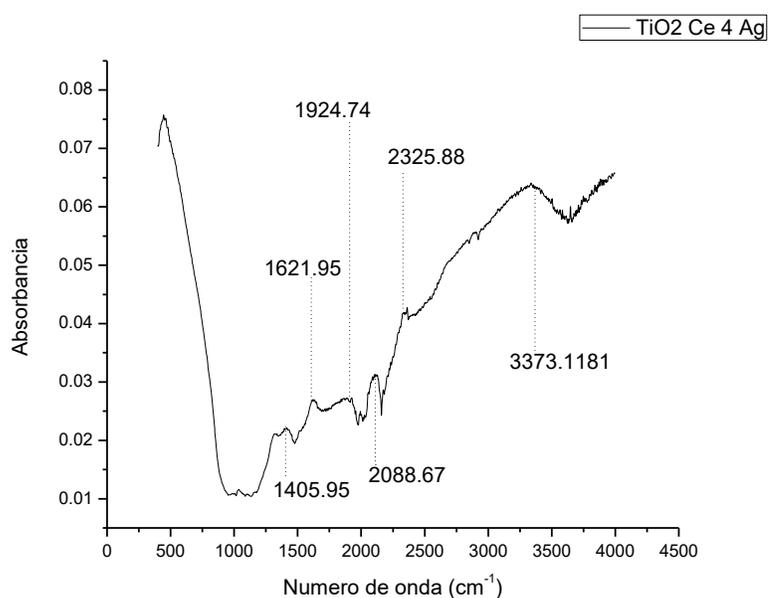


Ilustración 20. Espectrograma del material Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O₂

Para el material Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O₂, los picos que se localizan entre 3000 a 3427 cm⁻¹, son pertenecientes a los radicales hidroxilos, los que se encuentran entre 1624 a 1631 cm⁻¹, pertenecen a las moléculas de agua absorbidas. Debajo de los 1000 cm⁻¹, se atribuyen a las vibraciones de flexión Ti-O y Ti-O-Ti, los cuales presentan un ligero corrimiento, que indica la formación de enlaces Ti-O-Ce. La banda de 800 cm⁻¹

¹ pertenece a los enlaces Ti-O-Ti con una vibración acuosa, resultado de las reacciones de condensación, con estos datos se puede concluir que efectivamente existió un dopaje del cerio y no solamente la superposición de átomos.

8.2.- Evaluación antimicrobial

8.2.1.- Concentración mínima inhibitoria y concentración mínima bactericida

La concentración mínima inhibitoria se realizó en 10 tubos de ensaye con tapa, fueron numerados del 1 al 10, en los tubos 1-9 se colocaron 250 μ L de caldo bacteriano con la bacteria *Escherichia Coli*, y al tubo 10 se le agregaron 500 μ L, para mantener la misma concentración de bacteria por mL ya que su volumen final fue del doble que los otros, al tubo 1 se le agregaron 10 mg del material, $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, se repitió el mismo procedimiento para el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, teniendo una concentración inicial de 1mg/mL, quedando las siguientes concentraciones de material en cada tubo, observadas en la Tabla 7.

Material	Tubos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1mg/ml	0.5 mg/ml	0.25 mg/ml	0.125 mg/ml	0.062 mg/ml	0.031 mg/ml	0.015 mg/ml	0.007 mg/ml	0.003 mg/ml	0.001 mg/ml
$\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
$\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+

Tabla 7. Concentración mínima inhibitoria en *Escherichia coli*

NOTA: el signo (-) representa la ausencia de turbidez, y el (+) la presencia de turbidez.

En las ilustraciones 21 y 22 se presentan las pruebas de concentración mínima inhibitoria para observar la turbidez, a simple vista se observa que el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, presenta un mejor desempeño a bajas concentraciones en comparación con el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$.



Ilustración 21. Concentración mínima inhibitoria del material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$



Ilustración 22. Concentración mínima inhibitoria del material $Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$

Para obtener la concentración mínima bactericida, se tomó una muestra de cada tubo y se sembró en una caja Petri con agar MacConkey, se incubó durante 24 h a $37^{\circ}C$. Obteniendo las siguientes concentraciones, presentes en la Tabla 8:

Material	CMI	CMB
$Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$	0.25 mg/ml	1 mg/ml
$Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$	0.0625 mg/ml	0.125 mg/ml

Tabla 8. Concentraciones mínimas inhibitorias y mínimas bactericidas en los materiales $Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$ y $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$

Con los datos anteriores se comprueba que el material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$, presenta mejores resultados en bajas concentraciones en comparación con el material $Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O_2$.

Se realizaron las mismas pruebas para un consorcio de bacterias, con el fin de simular condiciones más cercanas a la realidad en un efluente de aguas residuales.

Para estas pruebas se probó el material Ag/TiO_2 , a las cuales se les agregaron 100 μL de caldo bacteriano con *Escherichia coli* y 100 μL de caldo bacteriano con *Salmonella typhimurium*, en los tubos 1-9, y en el tubo 10 al igual que en las pruebas pasadas se agregó lo doble de carga bacteriana para mantener la misma concentración por ml, a continuación, en la Tabla 9 se presentan los resultados.

Material	Tubos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1mg/ml	0.5 mg/ml	0.25 mg/ml	0.125 mg/ml	0.062 mg/ml	0.031 mg/ml	0.015 mg/ml	0.007 mg/ml	0.003 mg/ml	0.001 mg/ml
$\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
$\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Ag/TiO_2	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+

Tabla 9. Concentración mínima inhibitoria en consorcio de bacterias (*Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*)

Se observó que de nuevo el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ presenta mejores resultados que los materiales $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, y Ag/TiO_2 , de acuerdo con las ilustraciones 23, 24 y 25



Ilustración 23. Determinación de concentración mínima inhibitoria del material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$



Ilustración 24. Determinación de concentración mínima del material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$



Ilustración 25. Determinación de concentración mínima inhibitoria del material Ag/TiO₂

Para obtener las concentraciones mínimas bactericidas se tomaron muestras de cada tubo, y se sembraron en cajas Petri con agar MacConkey por 24 h a 37°C. de ahí se obtienen los siguientes resultados, presentes en la Tabla 10.

Material	CMI	CMB
Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O₂	0.25 mg/ml	1 mg/ml
Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O₂	0.0625 mg/ml	0.125 mg/ml
Ag/TiO₂	0.25 mg/ml	2 mg/ml

Tabla 10. Determinación de CMI y CMB para consorcio de bacterias

Con los datos obtenidos se concluye que el material que presenta mejor eficacia a bajas concentraciones es el Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O₂, eliminando el 100% de las colonias con una concentración de 0.125 mg/ml, aún en un conjunto de bacterias, este sigue conservando su eficacia, el material Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O₂, presenta buenos resultados, pero es necesario en concentraciones más altas, lo cual no lo hace una opción atractiva comercialmente, y por último el material Ag/TiO₂, requiere hasta el doble de las concentraciones mínimas bactericidas, en comparación con los otros materiales, esto indica que la adición del cerio, añade una mayor eficacia a la actividad bactericida del TiO₂ y la plata.

8.2.3.- Eliminación de colonias bacterianas

Se colocaron 10 ml de caldo bacteriano con 0.5 mg/ml del material, según corresponda el caso, se irradia durante 1 h con luz blanca, o durante 1 h con luz ultravioleta para activar el material. En el caso de las pruebas en ausencia de luz,

se repitieron los mismos pasos en un tubo de ensaye negro, protegiéndolo de la luz en cualquier momento e inmediatamente después se agregaron 100 μL de caldo bacteriano. En el caso de las pruebas del material expuesto a los diferentes tipos de luz, se agregó la misma cantidad de bacteria que en el tubo con ausencia de luz, una vez terminada su radiación.

Después se tomaron muestras a los tiempos 0,5,15,30,45,60,90 y 120 min, para realizar la cinética del material, posteriormente se entregan los resultados.

8.2.3.1.- Evaluación del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ en luz visible

8.2.3.1.1.- *Escherichia coli*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	352
5	316
15	87
30	15
45	0
60	0
90	0
120	0

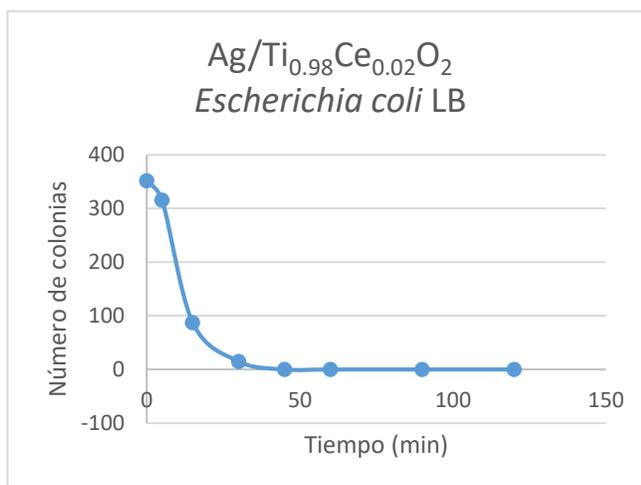


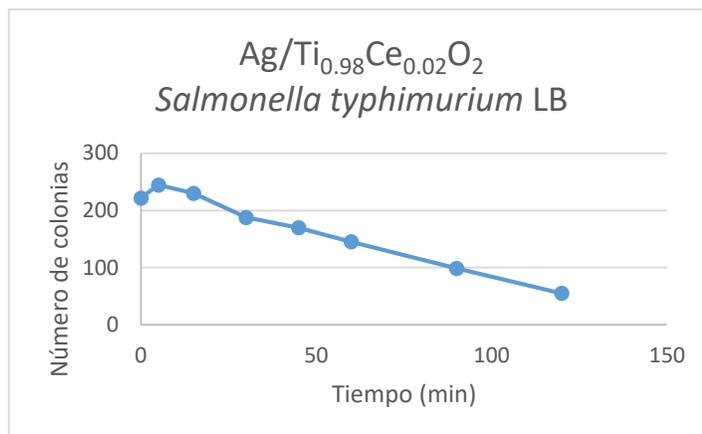
Tabla 11. Cinética de eliminación *Escherichia coli* LB Ce2

Ilustración 26. Gráfica de cinética en eliminación *Escherichia coli* LB Ce 2

Como se puede observar, el material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, presenta una eliminación completa pasados los 45 minutos de contacto con la muestra.

8.2.3.1.2.- *Salmonella typhimurium*

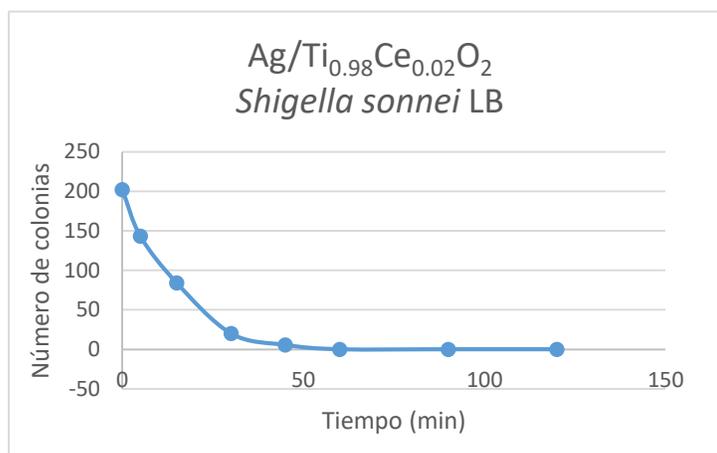
Tiempo (min)	Colonias promedio
0	222
5	245
15	230
30	188
45	170
60	145
90	99
120	55

Tabla 12. Cinética de eliminación *Salmonella typhimurium* LB Ce 2Ilustración 27. Gráfica de cinética en eliminación *Salmonella typhimurium* LB Ce 2

Como se observa, hay un decrecimiento progresivo, excepto en el tiempo 5 min, donde se encuentra un ligero repunte en el número de colonias, a pesar de que el número de colonias cada vez es menor, se logró únicamente una inhibición del 75.22% con el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, aun después de haber transcurrido 120 min.

8.2.3.1.3.- *Shigella sonnei*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	202
5	143
15	84
30	20
45	6
60	0
90	0
120	0

Tabla 13. Cinética de eliminación *Shigella sonnei* LB Ce2 Ilustración 28. Gráfica de cinética en eliminación *Shigella sonnei* LB Ce 2

Para esta evaluación, se optó por agregar una concentración de 1 mg/ml, debido a las características que presenta la bacteria, el número de colonias va disminuyendo

progresivamente, logrando su total inhibición a los 60 min de contacto con la muestra con el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$.

8.2.3.1.4.- *Staphylococcus aureus*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	170
5	131
15	139
30	136
45	112
60	76
90	44
120	24

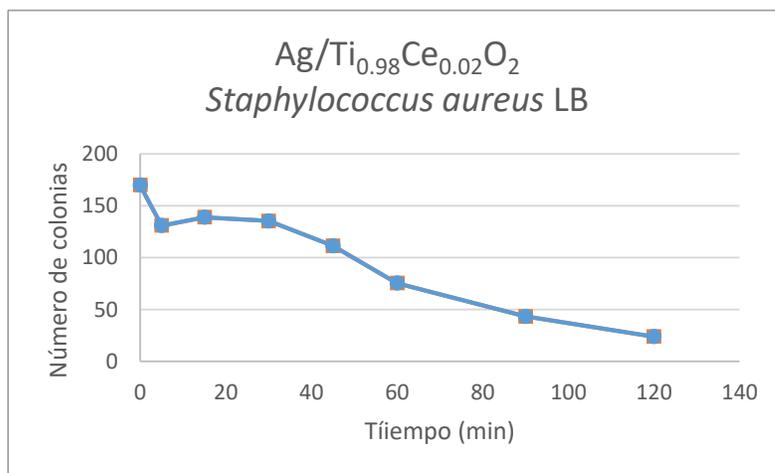


Tabla 14. Cinética de eliminación *Staphylococcus aureus* LB Ce 2 Ilustración 29. Gráfica de cinética en eliminación *Staphylococcus aureus* LB Ce 2

Se encuentra un decrecimiento progresivo, excepto en el tiempo 15 min, donde se observa un ligero repunte, a pesar de que el número de colonias disminuye, se logra una inhibición del 85.88% después de 120 min, con el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$.

8.2.3.2.- Evaluación del material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ en luz ultravioleta

8.2.3.2.1.- *Escherichia coli*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	221
5	156
15	84
30	12
45	11
60	4
90	0
120	0

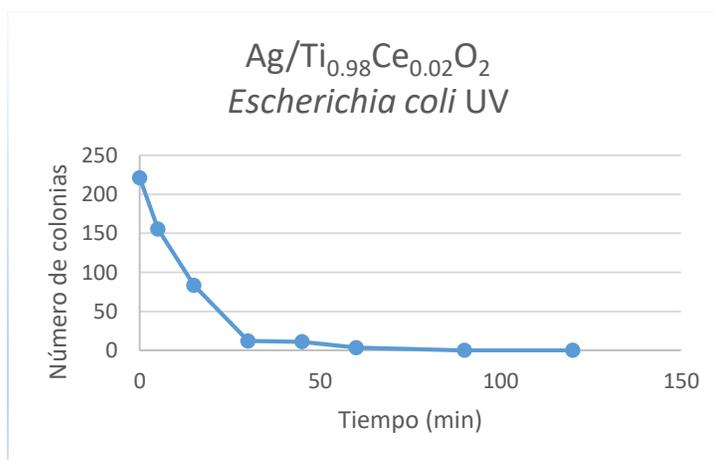


Tabla 15. Cinética de eliminación *Escherichia coli* UV Ce 2

Ilustración 30. Gráfica de cinética en eliminación *Escherichia coli* UV Ce 2

Se observa un decrecimiento progresivo, logrando una eliminación total de la muestra a los 90 min de contacto con el material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, se nota un mejor rendimiento del material en luz visible donde lo elimino en 45 min.

8.2.3.2.2.- *Salmonella typhimurium*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	243
5	236
15	215
30	162
45	107
60	67
90	47
120	24

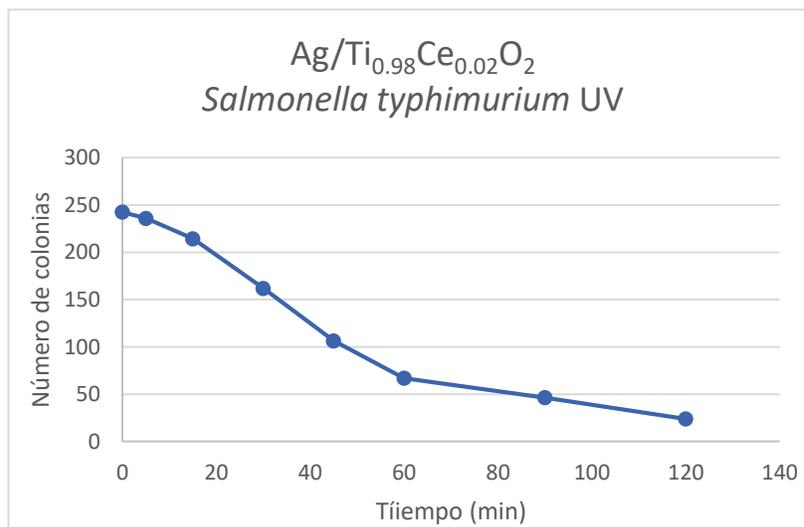


Ilustración 31. Gráfica de cinética en eliminación *Salmonella typhimurium* UV Ce 2

Tabla 16. Cinética de eliminación *Salmonella typhimurium* UV Ce 2

Se observa un decrecimiento progresivo del número de colonias, aunque no se logra la eliminación total ni aún pasados los 120 min, sin embargo, se observaron mejores resultados con el material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, en presencia de luz ultravioleta, que con este mismo en presencia de luz visible, ya que en esta se elimina un 90.12% de la carga bacteriana, en comparación con el 75.22% que se eliminó en la evaluación donde el material se expuso a luz blanca.

8.2.3.2.3.- *Shigella sonnei*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	224
5	134
15	81
30	55
45	21
60	0
90	0
120	0

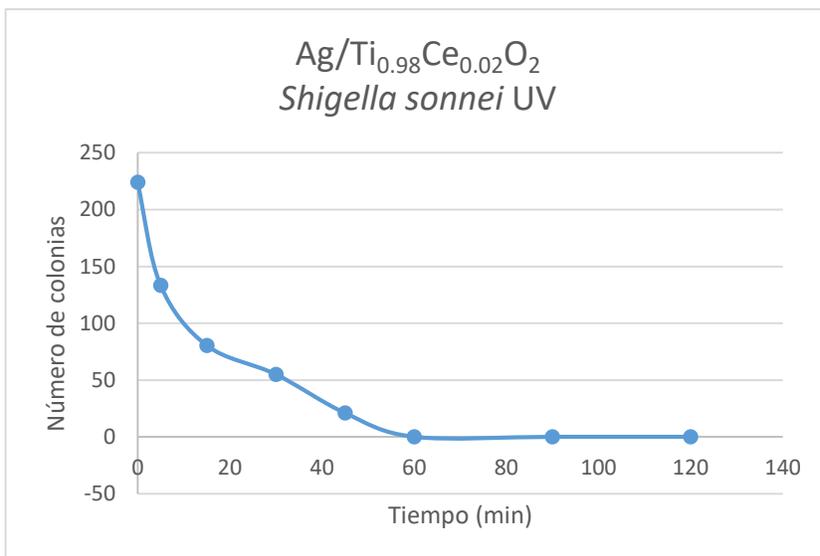


Tabla 17. Cinética de eliminación *Shigella sonnei* UV Ce2

Ilustración 32. Gráfica de cinética de eliminación *Shigella sonnei* UV Ce 2

Se observa un decrecimiento progresivo del número de colonias, logrando la eliminación total de estas pasados los 60 minutos de contacto con el material Ag/Ti_{0.98}Ce_{0.02}O₂, para esta evaluación se utilizó una concentración de 1 mg/ml, por la naturaleza de la bacteria, se observaron mejores resultados en pruebas con luz visible, presentando un total de 6 colonias a los 45 min y en esta evaluación se obtuvieron un total de 21 colonias al mismo tiempo.

8.2.3.2.4 *Staphylococcus aureus*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	150
5	135
15	125
30	105
45	109
60	101
90	48
120	9

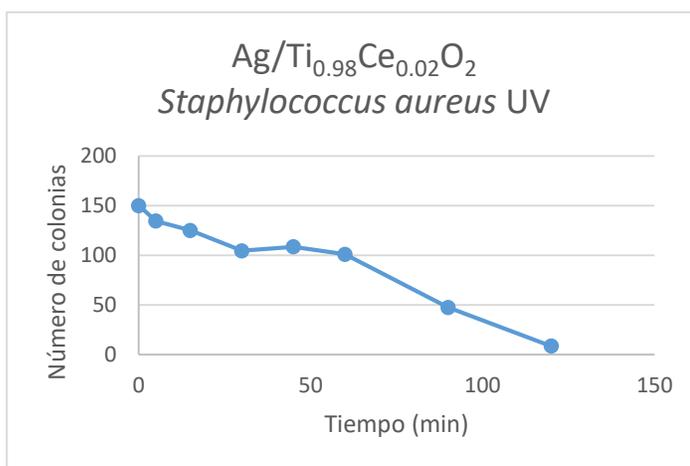


Tabla 18. Cinética de eliminación *Staphylococcus aureus* UV Ce2

Ilustración 33. Gráficas de cinética en eliminación *Staphylococcus aureus* UV Ce 2

Se observa un decrecimiento progresivo, a excepción por el ligero repunte que se observa en el tiempo 45, aunque disminuye la cantidad de colonias en un número considerable, no logra su eliminación total después de 120 min de contacto con el material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, se observaron mejores resultados en presencia de luz ultra violeta en comparación con luz visible, ya que en esta prueba se eliminó cerca del 94% de la carga bacteriana y en presencia de luz visible se eliminó únicamente el 85.8%.

8.2.3.3.- Evaluación del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ en ausencia de luz

8.2.3.3.1.- *Escherichia coli*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	260
5	118
15	3
30	0
45	0
60	0
90	0
120	0

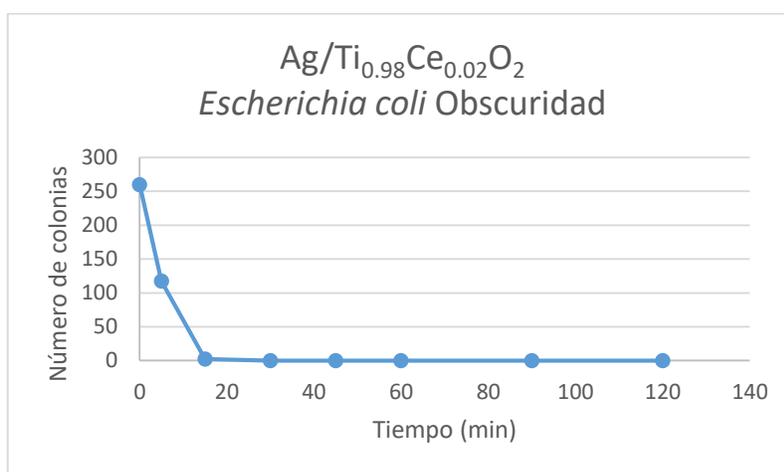


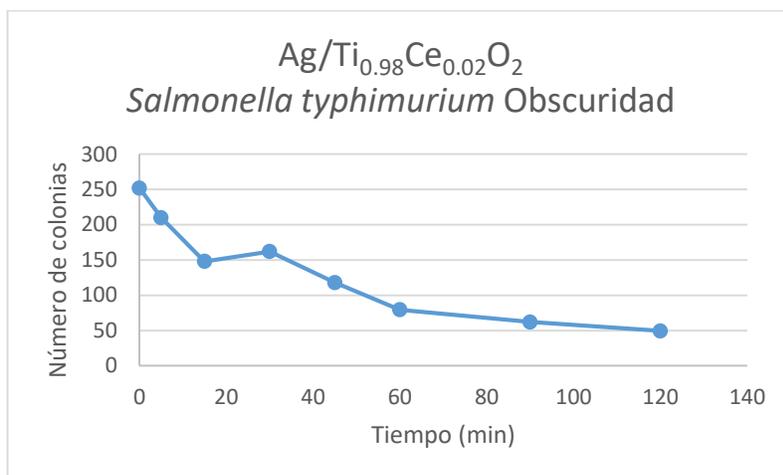
Tabla 19. Cinética de eliminación *Escherichia coli* Obs. Ce2

Ilustración 34. Gráfica de cinética en eliminación *Escherichia coli* obs. Ce 2

Se observa una eliminación total de las colonias a los 30 min, comparando el material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, en las tres evaluaciones se concluye que presenta un menor tiempo de eliminación en ausencia de luz visible y de luz ultravioleta.

8.2.3.3.2.- *Salmonella typhimurium*

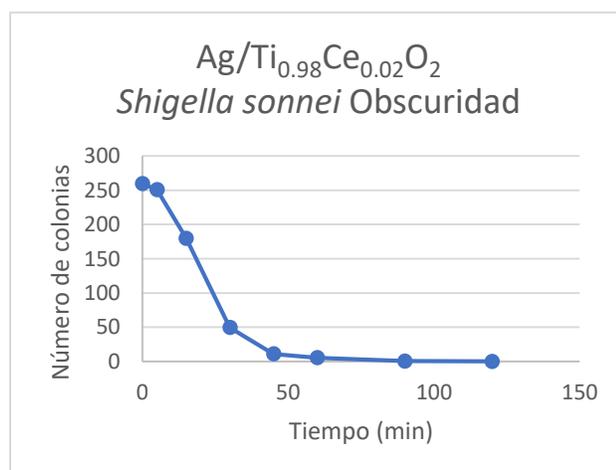
Tiempo (min)	Colonias promedio
0	252
5	210
15	148
30	162
45	118
60	80
90	62
120	50

Tabla 20. Cinética de eliminación *Salmonella typhimurium* obs. Ce 2Ilustración 35. Gráfica de cinética en eliminación *Salmonella typhimurium* obs. Ce 2

Se observa un decrecimiento progresivo en el número de colonias, a excepción del tiempo 30 min donde se encuentra un ligero repunte, a pesar de estar en contacto con el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ durante 120 min se logró inhibir únicamente el 80.15% de la carga bacteriana, teniendo esta evaluación una eficacia similar que la de la evaluación del material expuesto a luz visible.

8.2.3.3.3.- *Shigella sonnei*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	260
5	251
15	180
30	50
45	11
60	6
90	0
120	0

Tabla 21. Cinética de eliminación *Shigella sonnei* obs. Ce 2Ilustración 36. Gráfica de cinética en eliminación *Shigella sonnei* obs. Ce 2

Para esta evaluación al igual que en las anteriores se agregó una concentración de 1mg/ml, se observa un decrecimiento progresivo, logrando una eliminación total a los 90 min después de entrar en contacto con el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, en comparación con las evaluaciones en luz visible y en luz ultravioleta, se concluye que esta evaluación presento menor eficacia, debido a que requirió 30 minutos más para la eliminación total de la carga bacteriana.

8.2.3.3.4.- *Staphylococcus aureus*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	172
5	129
15	124
30	117
45	100
60	48
90	18
120	7

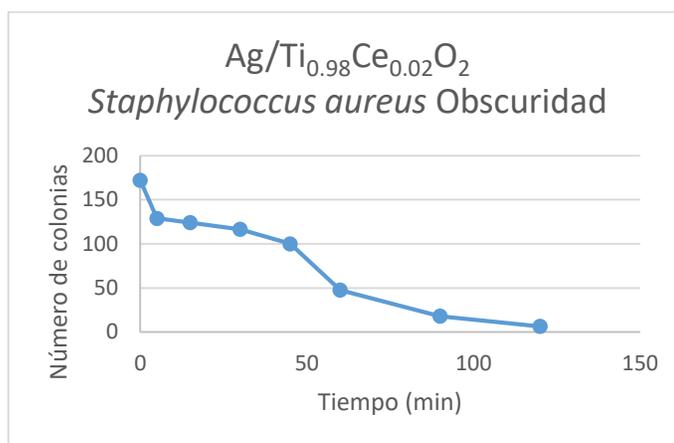


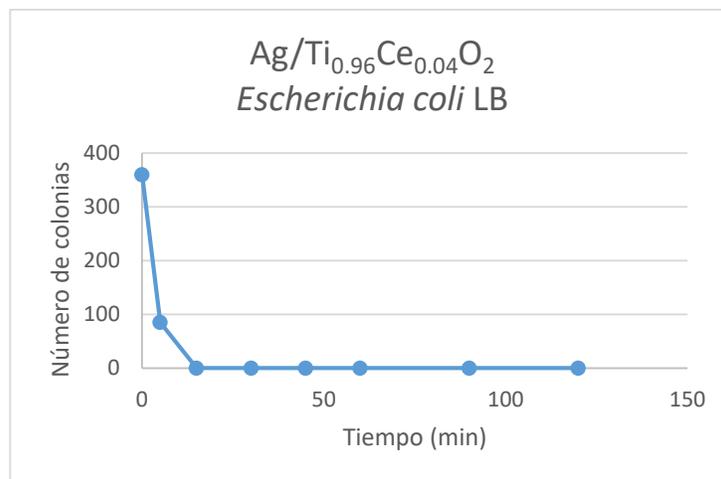
Tabla 22. Cinética de eliminación *Staphylococcus aureus* obs. Ce 2

Ilustración 37. Gráfica de cinética de eliminación *Staphylococcus aureus* obs. Ce 2

Se observa un decrecimiento progresivo, sin embargo, aún con 120 min de contacto con el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$, se inhibe únicamente el 95.93% de la carga bacteriana, en comparación con las otras evaluaciones, se concluye que las pruebas en ausencia de luz y con radiación UV presentan la mayor eficacia.

8.2.3.4.- Evaluación del material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ en luz visible8.2.3.4.1.- *Escherichia coli*

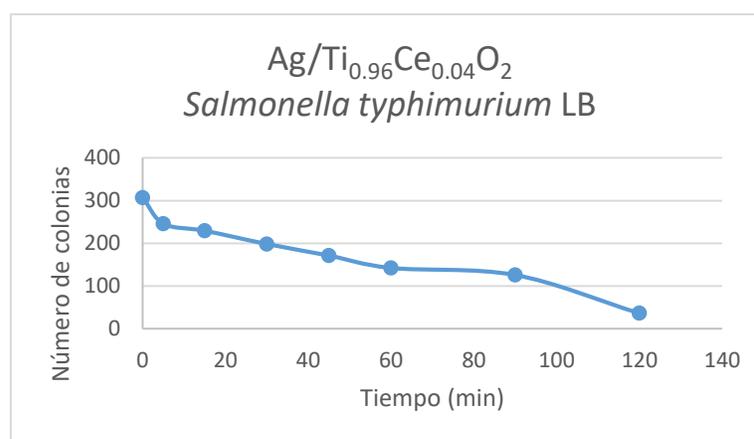
Tiempo (min)	Colonias promedio
0	360
5	85
15	0
30	0
45	0
60	0
90	0
120	0

Tabla 23. Cinética de eliminación *Escherichia coli* LB Ce 4Ilustración 38. Gráfica de cinética en eliminación *Escherichia coli* LB Ce4

Se observa que hay una eliminación total de carga bacteriana a los 15 minutos de contacto con el material $\text{Ag}/\text{Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$.

8.2.3.4.2.- *Salmonella typhimurium*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	308
5	246
15	230
30	199
45	172
60	143
90	126
120	37

Ilustración 39. Gráfica de cinética de eliminación *Salmonella typhimurium* LB Ce4Tabla 24. Cinética de eliminación *Salmonella typhimurium* LB Ce4

Se observa un decrecimiento progresivo sin embargo no logra eliminarse por completo la carga bacteriana, aún con 120 min en contacto con el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, presentando un 87.98 % de inhibición de la carga bacteriana.

8.2.3.4.3.- *Shigella sonnei*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	247
5	215
15	146
30	23
45	2
60	0
90	0
120	0

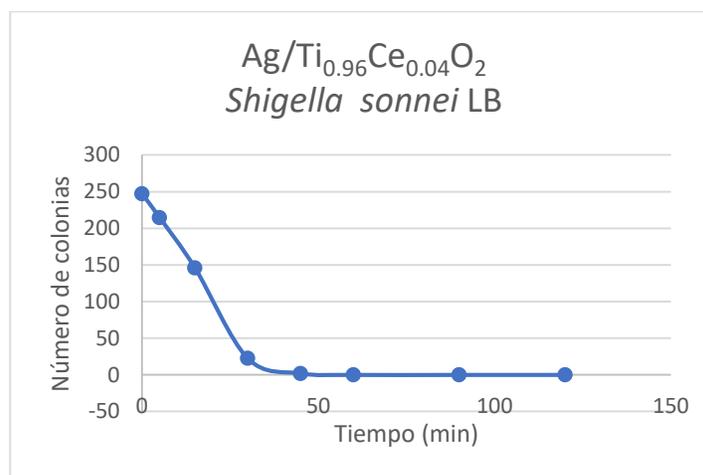


Tabla 25. Cinética de eliminación *Shigella sonnei* LB Ce4 Ilustración 40. Gráfica de cinética de eliminación *Shigella sonnei* LB Ce4

En esta evaluación al igual que en las anteriores con *Shigella sonnei* se utilizó una concentración de 1 mg/ml, se observa un decrecimiento progresivo, donde se logra la eliminación total de carga bacteriana a los 60 min de contacto con el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$.

8.2.3.4.4.- *Staphylococcus aureus*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	258
5	200
15	110
30	37
45	33
60	26
90	18
120	7

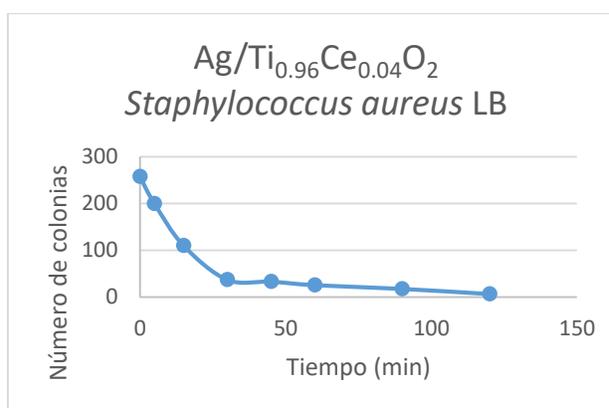


Tabla 26. Cinética de eliminación *Staphylococcus aureus* LB Ce4 Ilustración 41. Gráfica de cinética en eliminación *Staphylococcus aureus* LB Ce4

Se observa un decrecimiento progresivo, pero no se logra eliminar completamente el número de colonias aún transcurridos 120 min en contacto con el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, logrando la inhibición del 97.28% de la carga bacteriana.

8.2.3.5.- Evaluación del material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ en luz ultravioleta

8.2.3.5.1.- *Escherichia coli*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	179
5	48
15	2
30	3
45	0
60	0
90	0
120	0

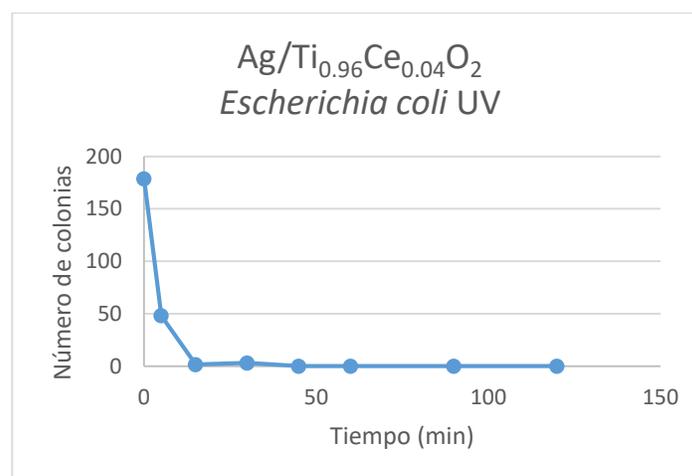


Tabla 27. Cinética de eliminación *Escherichia coli* UV Ce_4

Ilustración 42. Gráfica de cinética en eliminación *Escherichia coli* UV Ce_4

Se observa un decrecimiento progresivo, eliminando totalmente la carga bacteriana a los 45 min de exposición al material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, se notó que se obtuvieron mejores resultados con el material expuesto a luz visible, debido a que en la evaluación se eliminaba en 15 min completamente las colonias.

8.2.3.5.2.- *Salmonella typhimurium*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	281
5	262
15	256
30	248
45	224
60	179
90	137
120	95

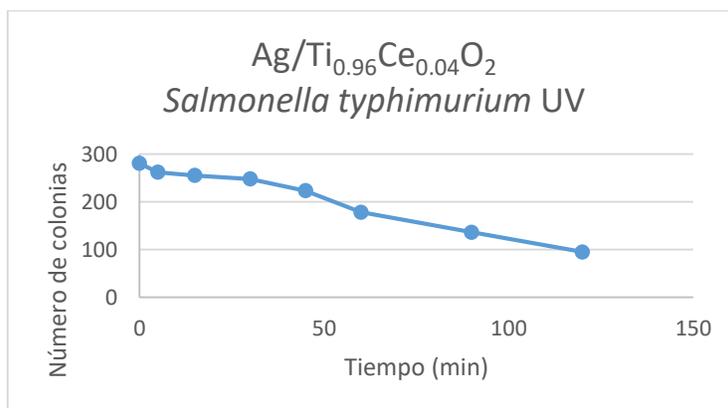


Ilustración 43. Gráfica de cinética en eliminación *Salmonella typhimurium* UV

Tabla 28. Cinética de eliminación *Salmonella typhimurium* UV Ce4 UV Ce4

A pesar de presentar un decrecimiento progresivo, no se logra eliminar completamente la carga bacteriana, con una exposición de 120 min del material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$, se inhibió el 66.19% de la carga bacteriana, mostrando una mayor eficacia exponiendo el material a luz visible, donde se inhibió el 87.98%.

8.2.3.5.3.- *Shigella sonnei*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	428
5	408
15	385
30	141
45	21
60	0
90	0
120	0

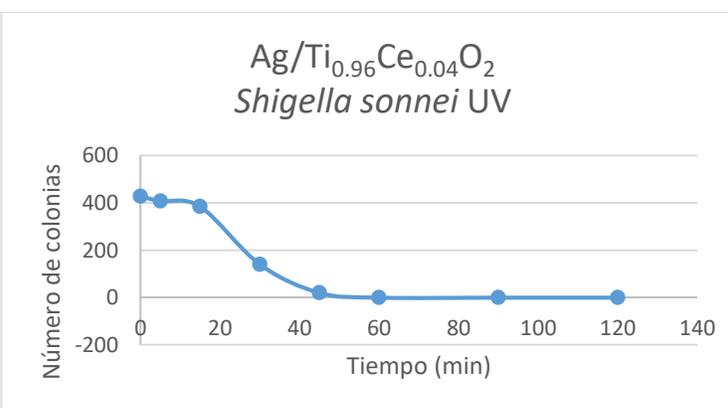


Ilustración 44. Gráfica de cinética en eliminación *Shigella sonnei* UV Ce4

Tabla 29. Cinética de eliminación *Shigella sonnei* UV Ce4

Al igual que en las otras evaluaciones con esta bacteria, se agregó 1 mg/ml del material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$, se observa un decrecimiento progresivo, donde se

elimina completamente la carga bacteriana a los 60 min, sin embargo, se observa una mejor eficacia con el material expuesto a la luz visible, donde se observa que el conteo de colonias a los 45 min es de 2, mientras que en las evaluaciones con radiación UV al mismo tiempo el conteo es de 21 colonias.

8.2.3.5.4.- *Staphylococcus aureus*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	229
5	199
15	147
30	112
45	109
60	79
90	59
120	38

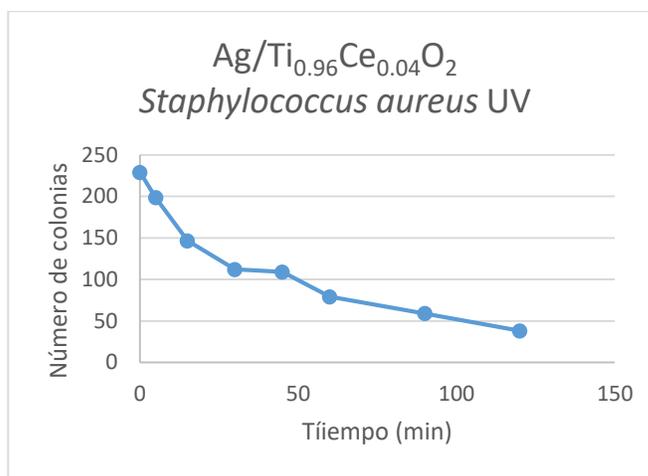


Tabla 30. Cinética de eliminación *Staphylococcus aureus* UV Ce4 Ilustración 45. Gráfica de cinética en eliminación *Staphylococcus aureus* UV Ce4

Se observa que la carga bacteriana presenta mayor decrecimiento conforme transcurre el tiempo de exposición al material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, sin embargo, no se logra eliminarla completamente en 120 min, solo inhibiendo el 83.40% de la carga bacteriana., en las evaluaciones en luz visible del mismo material, se presenta una mejoría en la eficacia, ya que en este mismo intervalo de tiempo se inhibió el 97.28%.

8.2.3.6.- Evaluación del material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$ en ausencia de luz

8.2.3.6.1.- *Escherichia coli*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	224
5	141
15	5
30	0
45	0
60	0
90	0
120	0

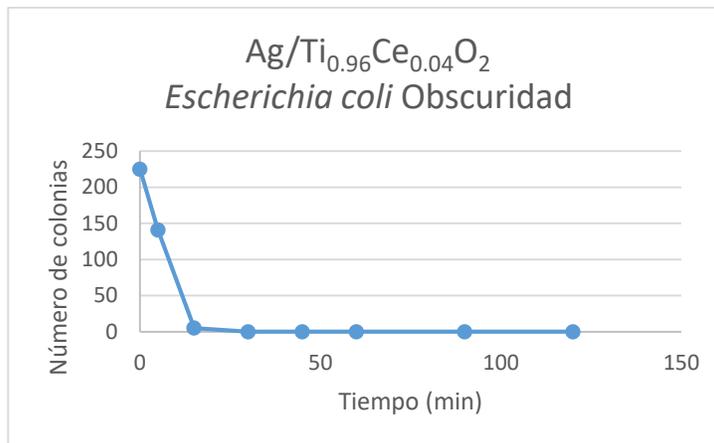


Ilustración 46. Gráfica de cinética en eliminación *Escherichia coli* Obs. Ce4

Tabla 31. Cinética de eliminación *Escherichia coli* Obs. Ce4

Se logró eliminar completamente la carga bacteriana a los 30 minutos de exposición al material $Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O_2$, aunque su eficacia es mayor a la del material expuesto a radiación UV, el cual eliminó el total de la carga en 45 min, no supera la eficacia del material expuesto a luz visible el cual eliminó totalmente la carga a los 15 min.

8.2.3.6.2.- *Salmonella typhimurium*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	280
5	272
15	274
30	272
45	263
60	185
90	146
120	47

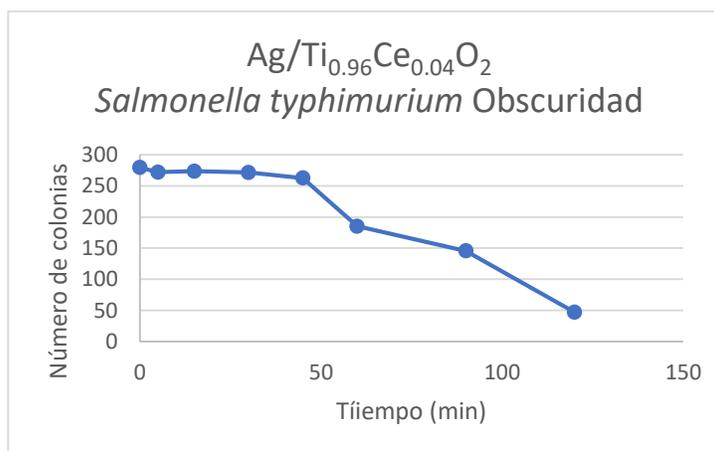


Ilustración 47. Gráfica de cinética en eliminación *Salmonella typhimurium* Obs. Ce4

Tabla 32. Cinética de eliminación *Salmonella typhimurium* Obs. Ce4

A pesar de que la carga bacteriana presenta un decrecimiento progresivo, no se logra erradicar completamente a los 120 min de exposición con el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, presentando una inhibición del 83.21% de carga bacteriana al finalizar este tiempo, aunque sus resultados son muy parecidos a los del material expuesto a luz visible, las evaluaciones en luz visible presentan una mayor eficacia.

8.2.3.6.3.- *Shigella sonnei*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	195
5	164
15	117
30	47
45	14
60	3
90	0
120	0

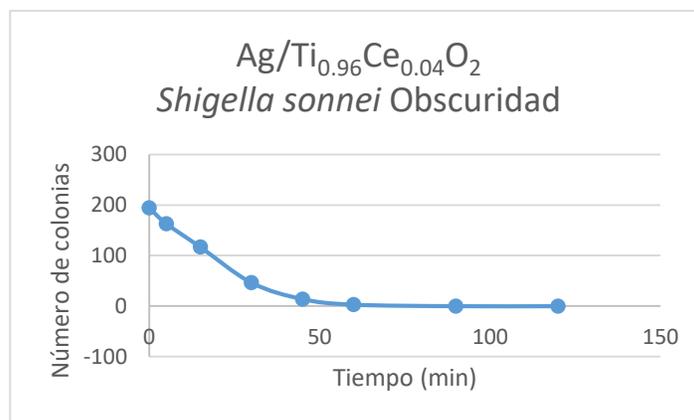


Ilustración 48. Gráfica de cinética en eliminación *Shigella sonnei* Obs. Ce4

Tabla 33. Cinética de eliminación *Shigella sonnei* Obs. Ce4

Al igual que en las otras evaluaciones, se utilizó la concentración 1mg/ml del material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, se observa un decrecimiento progresivo, hasta lograr la eliminación total de la carga bacteriana en 90 min, esta prueba en comparación con las del material expuesto a luz visible y luz ultra violeta, es la que presenta menor eficacia, puesto que tarda un mayor tiempo en erradicar completamente las colonias.

8.2.3.6.4.- *Staphylococcus aureus*

Tiempo (min)	Colonias promedio
0	288
5	274
15	210
30	20
45	22
60	6
90	3
120	0

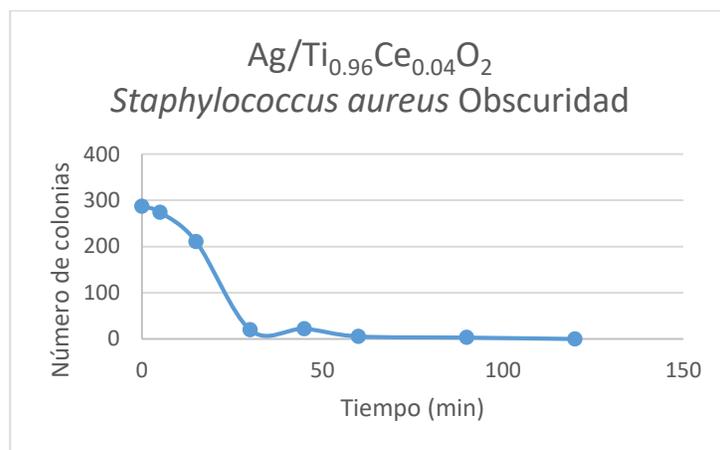


Tabla 34. Cinética de eliminación *Staphylococcus aureus* Obs. Ce4

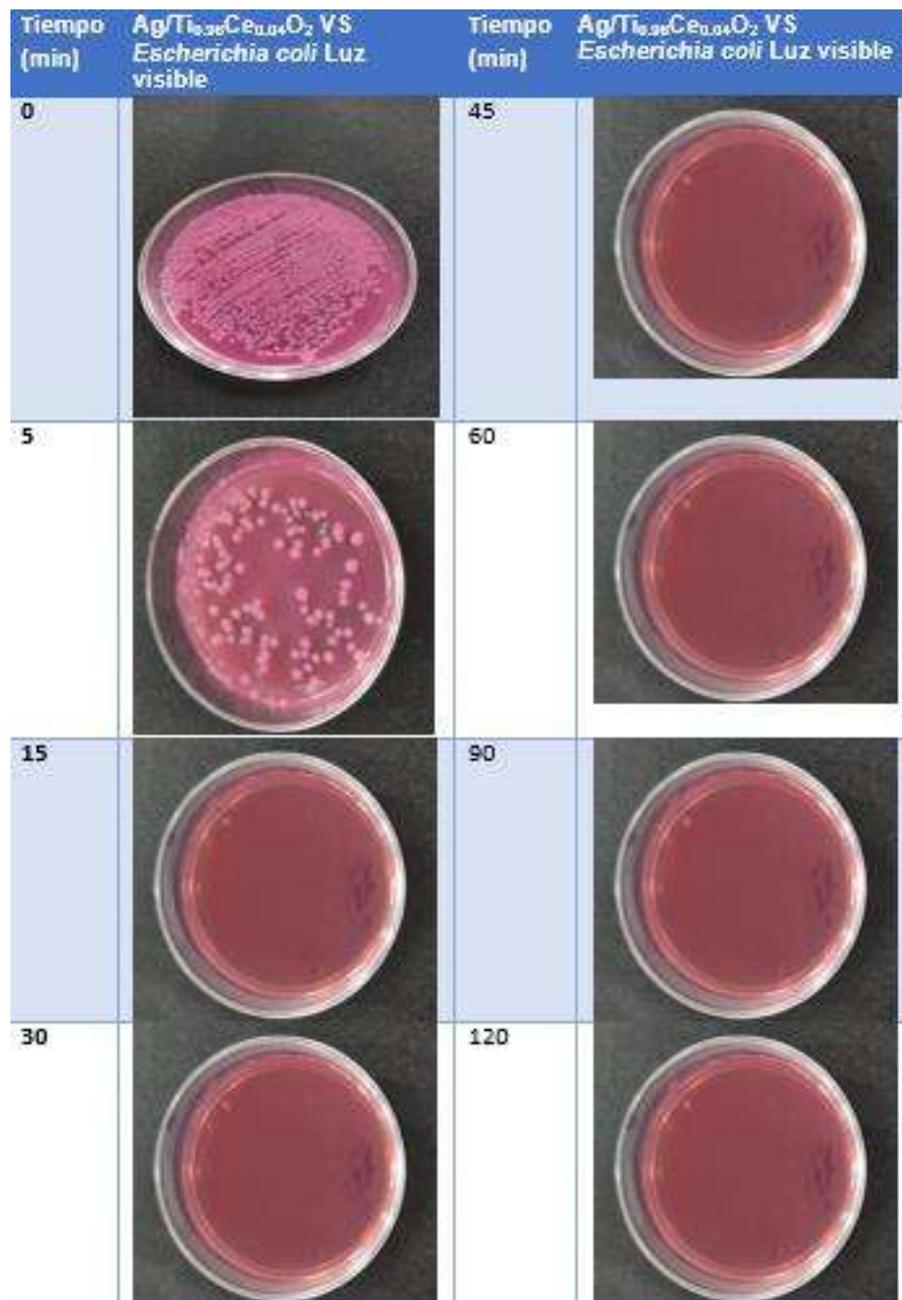
Ilustración 49. Gráfica de cinética en eliminación *Staphylococcus aureus* Obs. Ce4

Se presenta un decrecimiento progresivo, logrando la eliminación total de carga bacteriana a los 120 min de exposición al material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, siendo hasta el momento la evaluación con mayor eficacia, respecto a las evaluaciones en luz visible y luz ultravioleta, debido a que fue en la única en la que se logró eliminar completamente la carga bacteriana.

A continuación, en la Tabla 35, se presenta un resumen con los resultados de las evaluaciones de los materiales, con sus distintas variantes.

Bacteria	Ag/Ti _{0.98} Ce _{0.02} O ₂			Ag/Ti _{0.96} Ce _{0.04} O ₂		
	Luz Visible	Luz Ultravioleta	Ausencia de luz	Luz Visible	Luz Ultravioleta	Ausencia de luz
<i>Escherichia coli</i>	Eliminación total a los 45 min	Eliminación total a los 90 min	Eliminación total a los 30 min	Eliminación total a los 15 min	Eliminación total a los 45 min	Eliminación total a los 30 min
<i>Salmonella typhimurium</i>	Inhibe el 75.22% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 90.12% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 80.15% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 87.98% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 66.19% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 83.21% de la carga bacteriana en 120 min.
<i>Shigella sonnei</i>	Eliminación total a los 60 min	Eliminación total a los 60 min	Eliminación total a los 90 min	Eliminación total a los 60 min	Eliminación total a los 60 min	Eliminación total a los 90 min
<i>Staphylococcus aureus</i>	Inhibe el 85.88% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 94% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 95.93% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 97.28% de la carga bacteriana en 120 min.	Inhibe el 83.40% de la carga bacteriana en 120 min.	Eliminación total a los 120 min

Tabla 35. Resumen de cinéticas de todas las evaluaciones



En la Ilustración 50 Se muestra un ejemplo de las evaluaciones, no se incluyeron imágenes de las diferentes evaluaciones debido a que el presente trabajo se extendería demasiado, por ello se optó por solo presentar uno de manera significativa.

Ilustración 50. Evidencias de evaluación del material Ag/Ti_{0.96}Ce_{0.04}O₂ VS Escherichia coli en Luz visible

9.- Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados presentados, de la difracción de rayos X, se observa que los picos característicos de cada material se encuentran entre 25.3 y 25.5, las cuales son representativas de la anatasa, a 500°C el TiO_2 , genera rutilo (Allen et al., 2018; Yu et al., 2009), sin embargo, al doparse con cerio, se observa que este inhibe la transformación de la fase anatasa a rutilo, así mismo, la presencia del cerio, afecta la cristalinidad del material, disminuyéndola como mencionaba (Zhang et al, 2014).

De la determinación de área superficial por el método BET, se observa que la presencia del cerio, llega a incrementar hasta en un 40% el área superficial del material, y a mayor concentración de cerio, mayor es el incremento en dicha área, sin embargo, al adicionar la plata, se observa una ligera disminución en el área superficial, debido a la presencia de plata contenida en los poros del material.

De acuerdo con la microscopia electrónica de barrido, se observa que la presencia del cerio, afecta las propiedades de la superficie del materia, a mayor presencia de cerio, se obtiene un mayor número de aglomeraciones de plata en la superficie, de acuerdo con el análisis EDS se observa que el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ presenta un porcentaje cercano al 2.4% y no al 3% en peso que era lo esperado, por lo tanto, revisando la bitácora experimental se observó que a este material se le agrego un volumen de agua mayor que al material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ y eso afecto los resultados.

Respecto a la efectividad antimicrobial, se observa que bajas concentraciones (0.5 mg/ml) del material, no son suficientes para la eliminación completa en 120 min, de cepas como *Salmonella typhimurium* y *Staphylococcus aureus*, así como tampoco para *Shigella sonnei*, ni los consorcios. En términos generales el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, presenta una mayor eficacia, ya que contiene una mayor cantidad de plata, la unión $\text{TiO}_2\text{-Ce-Ag}$, representa una alternativa viable para la eliminación de agentes patógenos en aguas residuales, puesto que no generan resistencia bacteriana.

10.- Conclusiones

Se logró sintetizar el material mesoporoso $\text{Ag/Ti}_{1-x}\text{Ce}_x\text{O}_2$ mediante la técnica sol gel, asistida por microondas.

No se logró establecer una relación óptima plata-cerio, sin embargo, dentro de los materiales sintetizados, se obtuvieron mejores resultados con el material que contenía 4% molar de cerio y 3% en peso de plata, que con el material que únicamente contenía un 2% molar de cerio.

El material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$ fue el que obtuvo un mejor rendimiento como bactericida en las pruebas realizadas en presencia de luz visible y luz ultravioleta, mientras que el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ obtuvo una mayor eficacia en ausencia de luz.

La CMI para el material $\text{Ag/Ti}_{0.98}\text{Ce}_{0.02}\text{O}_2$ en presencia de carga bacteriana fue 0.25 mg/mL, mientras que la CMB fue de 1 mg/mL, para el material $\text{Ag/Ti}_{0.96}\text{Ce}_{0.04}\text{O}_2$, se obtuvo una CMI de 0.0625 mg/mL, y la CMB fue de 0.125 mg/mL. Sin embargo, al realizar las evaluaciones del material a determinados tiempos, se observó que esta concentración no era la suficiente para inhibir completamente la carga bacteriana de ciertas cepas en un periodo de 2h, por lo cual se concluye que para una mayor eficacia es necesario utilizar la concentración de 1 mg/mL, para asegurar una inhibición completa.

Sugerencias para trabajos futuros: A manera personal se sugiere, enfrentar el material en un sistema más parecido a la realidad, debido a que, de acuerdo con los antecedentes usados para esta investigación, los fotocatalizadores empleados, tienen múltiples propiedades que le permiten englobar un sistema de agua residual más complejo, con diversos tipos de contaminantes.

11.- Referencias

Agafonov, A. V., & Vinogradov, A. V. (2008). Sol-gel synthesis, preparation and characterization of photoactive TiO₂ with ultrasound treatment. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 49(2), 180–185. <https://doi.org/10.1007/s10971-008-1856-3>

Akhavan, O. (2009). Lasting antibacterial activities of Ag-TiO₂/Ag/a-TiO₂ nanocomposite thin film photocatalysts under solar light irradiation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 336(1), 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.03.018>

Akurati, K. K., Bhattacharya, S. S., Winterer, M., & Hahn, H. (2006). Synthesis, characterization and sintering of nanocrystalline titania powders produced by chemical vapour synthesis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(10), 2248–2254. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/10/037>

Alexander, J. W. (2009). History of the Medical Use of Silver. *Surgical Infections*, 10(3), 289–292. <https://doi.org/10.1089/sur.2008.9941>

Allen, N. S., Mahdjoub, N., Vishnyakov, V., Kelly, P. J., & Kriek, R. J. (2018). The effect of crystalline phase (anatase, brookite and rutile) and size on the photocatalytic activity of calcined polymorphic titanium dioxide (TiO₂). *Polymer Degradation and Stability*, 150, 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.02.008>

Anpo, M., Kishiguchi, S., Ichihashi, Y., Takeuchi, M., Yamashita, H., Ikeue, K., Morin, B., Davidson, A., & Che, M. (2001). The design and development of second-generation titanium oxide photocatalysts able to operate under visible light irradiation by applying a metal ion-implantation method. *Research on Chemical Intermediates*, 27(4–5), 459–467. <https://doi.org/10.1163/156856701104202101>

Antimicrobial therapies for Gram-positive infections. (2017). *Clinical Pharmacist*. Published. <https://doi.org/10.1211/cp.2017.20203363>

- Asahi, R. (2001). Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides. *Science*, 293(5528), 269–271. <https://doi.org/10.1126/science.1061051>
- Balaji, S., Mutharasu, D., Sankara Subramanian, N., & Ramanathan, K. (2009). A review on microwave synthesis of electrode materials for lithium-ion batteries. *Ionics*, 15(6), 765–777. <https://doi.org/10.1007/s11581-009-0350-4>
- Bansal, P., & Verma, A. (2018). N, Ag co-doped TiO₂ mediated modified in-situ dual process (modified photocatalysis and photo-Fenton) in fixed-mode for the degradation of Cephalexin under solar irradiations. *Chemosphere*, 212, 611–619. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.120>
- Bapat, R. A., Chaubal, T. V., Joshi, C. P., Bapat, P. R., Choudhury, H., Pandey, M., Gorain, B., & Kesharwani, P. (2018). An overview of application of silver nanoparticles for biomaterials in dentistry. *Materials Science and Engineering: C*, 91, 881–898. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.05.069>
- Behnajady, M. A., & Eskandarloo, H. (2013). Characterization and Photocatalytic Activity of Ag–Cu/TiO₂ Nanoparticles Prepared by Sol–Gel Method. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13(1), 548–553. <https://doi.org/10.1166/jnn.2013.6859>
- Benli, B., & Yalın, C. (2017). The influence of silver and copper ions on the antibacterial activity and local electrical properties of single sepiolite fiber: A conductive atomic force microscopy (C-AFM) study. *Applied Clay Science*, 146, 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.024>
- Beveridge, T. (2001a). Use of the Gram stain in microbiology. *Biotechnic & Histochemistry*, 76(3), 111–118. <https://doi.org/10.1080/bih.76.3.111.118>
- Beveridge, T. (2001b). Use of the Gram stain in microbiology. *Biotechnic & Histochemistry*, 76(3), 111–118. <https://doi.org/10.1080/bih.76.3.111.118>
- Bevilacqua, E. (2004). Health and Safety Manager Tioxide Europe SAS. *Huntsman European Environmen*, 1, 1–26. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/14798>

Blaser, M. J., & Newman, L. S. (1982). A Review of Human Salmonellosis: I. Infective Dose. *Clinical Infectious Diseases*, 4(6), 1096–1106. <https://doi.org/10.1093/clinids/4.6.1096>

Börjesson, S., Matussek, A., Melin, S., Löfgren, S., & Lindgren, P. (2010). Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in municipal wastewater: an uncharted threat? *Journal of Applied Microbiology*, 108(4), 1244–1251. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04515.x>

Bridle, H. (2013). *Waterborne Pathogens: Detection Methods and Applications* (1.^a ed.). Academic Press.

Brooks, J. P., Adeli, A., & McLaughlin, M. R. (2014). Microbial ecology, bacterial pathogens, and antibiotic resistant genes in swine manure wastewater as influenced by three swine management systems. *Water Research*, 57, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.017>

Burda, C., Chen, X., Narayanan, R., & El-Sayed, M. A. (2005). Chemistry and Properties of Nanocrystals of Different Shapes. *Chemical Reviews*, 105(4), 1025–1102. <https://doi.org/10.1021/cr030063a>

Burda, C., Lou, Y., Chen, X., Samia, A. C. S., Stout, J., & Gole, J. L. (2003). Enhanced Nitrogen Doping in TiO₂ Nanoparticles. *Nano Letters*, 3(8), 1049–1051. <https://doi.org/10.1021/nl034332o>

Busiakiewicz, A., Kisieleska, A., Piwoński, I., & Batory, D. (2017). The effect of Fe segregation on the photocatalytic growth of Ag nanoparticles on rutile TiO₂(001). *Applied Surface Science*, 401, 378–384. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.008>

Cano-Franco, J. C., & Álvarez-Láinez, M. (2019). Effect of CeO₂ content in morphology and optoelectronic properties of TiO₂-CeO₂ nanoparticles in visible light organic degradation. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 90, 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.10.017>

- Carey, J. H., Lawrence, J., & Tosine, H. M. (1976). Photodechlorination of PCB's in the presence of titanium dioxide in aqueous suspensions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 16(6), 697–701. <https://doi.org/10.1007/bf01685575>
- Cervantes, C. 1992. Bacterias que expulsan metales pesados. *Información Científica y Tecnológica* 14:13-17.
- Chalker, R. B., & Blaser, M. J. (1988). A Review of Human Salmonellosis: III. Magnitude of Salmonella Infection in the United States. *Clinical Infectious Diseases*, 10(1), 111–124. <https://doi.org/10.1093/clinids/10.1.111>
- Chatterjee, S., & Raval, I. H. (2019). Pathogenic Microbial Genetic Diversity with Reference to Health. *Microbial Diversity in the Genomic Era*, 559–577. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814849-5.00032-0>
- Chen, R., Ni, H., Zhang, H., Yue, G., Zhan, W., & Xiong, P. (2013). A preliminary study on antibacterial mechanisms of silver ions implanted stainless steel. *Vacuum*, 89, 249–253. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.05.025>
- Chow, L., Waldron, L., & Gillings, M. R. (2015). Potential impacts of aquatic pollutants: sub-clinical antibiotic concentrations induce genome changes and promote antibiotic resistance. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00803>
- Clauser, H. R. (1990). *The Encyclopedia of Engineering Materials and Processes*. Labor S. A.
- Daghrir, R., Drogui, P., & Robert, D. (2013). Modified TiO₂ For Environmental Photocatalytic Applications: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(10), 3581–3599. <https://doi.org/10.1021/ie303468t>
- Dantes, R. (2013). National Burden of Invasive Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Infections, United States, 2011. *JAMA Internal Medicine*. Published. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2013.10423>

Davies, J., & Davies, D. (2010). Origins and Evolution of Antibiotic Resistance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 74(3), 417–433. <https://doi.org/10.1128/mubr.00016-10>

de Jong, B., & Ekdahl, K. (2006). The comparative burden of salmonellosis in the European Union member states, associated and candidate countries. *BMC Public Health*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2458-6-4>

Delcour, A. H. (2009). Outer membrane permeability and antibiotic resistance. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*, 1794(5), 808–816. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2008.11.005>

Désaunay, T., Ringuedé, A., Cassir, M., Labat, F., & Adamo, C. (2012). Modeling basic components of solid oxide fuel cells using density functional theory: Bulk and surface properties of CeO₂. *Surface Science*, 606(3–4), 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2011.10.011>

di Paola, A., Bellardita, M., & Palmisano, L. (2013). Brookite, the Least Known TiO₂ Photocatalyst. *Catalysts*, 3(1), 36–73. <https://doi.org/10.3390/catal3010036>

DuPont, H. L. (2014). Acute Infectious Diarrhea in Immunocompetent Adults. *New England Journal of Medicine*, 370(16), 1532–1540. <https://doi.org/10.1056/nejmra1301069>

Durán, N., Nakazato, G., & Seabra, A. B. (2016). Antimicrobial activity of biogenic silver nanoparticles, and silver chloride nanoparticles: an overview and comments. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(15), 6555–6570. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7657-7>

Elahifard, M. R., & Meidanshahi, R. V. (2017). Photo-Deposition of Ag Metal Particles on Ni-Doped TiO₂ for Photocatalytic Application. *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism*, 42(3), 244–250. <https://doi.org/10.3184/146867817x14821527549130>

Espino-Estévez, M., Fernández-Rodríguez, C., González-Díaz, O. M., Araña, J., Espínos, J., Ortega-Méndez, J., & Doña-Rodríguez, J. M. (2016). Effect of TiO₂-Pd

and TiO₂-Ag on the photocatalytic oxidation of diclofenac, isoproturon and phenol. *Chemical Engineering Journal*, 298, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.016>

Esposito, S. (2019). “Traditional” Sol-Gel Chemistry as a Powerful Tool for the Preparation of Supported Metal and Metal Oxide Catalysts. *Materials*, 12(4), 668. <https://doi.org/10.3390/ma12040668>

Everest, P., Wain, J., Roberts, M., Rook, G., & Dougan, G. (2001). The molecular mechanisms of severe typhoid fever. *Trends in Microbiology*, 9(7), 316–320. [https://doi.org/10.1016/s0966-842x\(01\)02067-4](https://doi.org/10.1016/s0966-842x(01)02067-4)

Fan, X., Zhang, G., & Zhang, F. (2015). Multiple roles of graphene in heterogeneous catalysis. *Chemical Society Reviews*, 44(10), 3023–3035. <https://doi.org/10.1039/c5cs00094g>

Fenwick, A. (2006). Waterborne Infectious Diseases--Could They Be Consigned to History? *Science*, 313(5790), 1077–1081. <https://doi.org/10.1126/science.1127184>

Fernández, A., Lassaletta, G., Jiménez, V., Justo, A., González-Elipe, A., Herrmann, J. M., Tahiri, H., & Ait-Ichou, Y. (1995). Preparation and characterization of TiO₂ photocatalysts supported on various rigid supports (glass, quartz and stainless steel). Comparative studies of photocatalytic activity in water purification. *Applied Catalysis B: Environmental*, 7(1–2), 49–63. [https://doi.org/10.1016/0926-3373\(95\)00026-7](https://doi.org/10.1016/0926-3373(95)00026-7)

Fiorenza, R., Bellardita, M., D'Urso, L., Compagnini, G., Palmisano, L., & Scirè, S. (2016). Au/TiO₂-CeO₂ Catalysts for Photocatalytic Water Splitting and VOCs Oxidation Reactions. *Catalysts*, 6(8), 121. <https://doi.org/10.3390/catal6080121>

Firmino, H. C., Nascimento, E. P., Bonan, R. F., Maciel, P. P., Castellano, L. R., Santana, L. N., Neves, G. A., & Menezes, R. R. (2021). Antifungal activity of TiO₂-CeO₂ nanofibers against *Candida* fungi. *Materials Letters*, 283, 128709. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128709>

Franzolin, M. R., Alves, R. C. B., Keller, R., Gomes, T. A. T., Beutin, L., Barreto, M. L., Milroy, C., Strina, A., Ribeiro, H., & Trabulsi, L. R. (2005). Prevalence of diarrheagenic *Escherichia coli* in children with diarrhea in Salvador, Bahia, Brazil. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 100(4), 359–363. <https://doi.org/10.1590/s0074-02762005000400004>

FUJISHIMA, A. K. I. R. A., & HONDA, K. E. N. I. C. H. I. (1972). Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, 238(5358), 37–38. <https://doi.org/10.1038/238037a0>

Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000a). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1(1), 1–21. [https://doi.org/10.1016/s1389-5567\(00\)00002-2](https://doi.org/10.1016/s1389-5567(00)00002-2)

Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000b). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1(1), 1–21. [https://doi.org/10.1016/s1389-5567\(00\)00002-2](https://doi.org/10.1016/s1389-5567(00)00002-2)

García-Fulgueiras, A., Sánchez, S., Guillén, J., Marsilla, B., Aladueña, A., & Navarro, C. (2001). A large outbreak of *Shigella sonnei* gastroenteritis associated with consumption of fresh pasteurised milk cheese. *European Journal of Epidemiology*, 17(6), 533–538. <https://doi.org/10.1023/a:1014504305666>

GAYNOR, K., PARK, S. Y., KANENAKA, R., COLINDRES, R., MINTZ, E., RAM, P. K., KITSUTANI, P., NAKATA, M., WEDEL, S., BOXRUD, D., JENNINGS, D., YOSHIDA, H., TOSAKA, N., HE, H., CHING-LEE, M., & EFFLER, P. V. (2009). International foodborne outbreak of *Shigella sonnei* infection in airline passengers. *Epidemiology and Infection*, 137(3), 335–341. <https://doi.org/10.1017/s0950268807000064>

George, I., Crop, P., & Servais, P. (2001). Use of β -D-galactosidase and β -D-glucuronidase activities for quantitative detection of total and fecal coliforms in wastewater. *Canadian Journal of Microbiology*, 47(7), 670–675. <https://doi.org/10.1139/w01-055>

Goldberg, M. B., & Rubin, R. H. (1988). The Spectrum of Salmonella Infection. *Infectious Disease Clinics of North America*, 2(3), 571–598. [https://doi.org/10.1016/s0891-5520\(20\)30212-9](https://doi.org/10.1016/s0891-5520(20)30212-9)

Goldstein, R. E. R., Micallef, S. A., Gibbs, S. G., Davis, J. A., He, X., George, A., Kleinfelter, L. M., Schreiber, N. A., Mukherjee, S., Sapkota, A., Joseph, S. W., & Sapkota, A. R. (2012). Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) Detected at Four U.S. Wastewater Treatment Plants. *Environmental Health Perspectives*, 120(11), 1551–1558. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205436>

Grabow, W.O.K. Waterborne Diseases: Update on Water Quality Assessment and Control. *Water SA* 1996, 22, 193–202

Graham, P. L., Lin, S. X., & Larson, E. L. (2006). A U.S. Population-Based Survey of *Staphylococcus aureus* Colonization. *Annals of Internal Medicine*, 144(5), 318. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-144-5-200603070-00006>

Gu, B., Cao, Y., Pan, S., Zhuang, L., Yu, R., Peng, Z., Qian, H., Wei, Y., Zhao, L., Liu, G., & Tong, M. (2012). Comparison of the prevalence and changing resistance to nalidixic acid and ciprofloxacin of *Shigella* between Europe–America and Asia–Africa from 1998 to 2009. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 40(1), 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2012.02.005>

Gullberg, E., Cao, S., Berg, O. G., Ilbäck, C., Sandegren, L., Hughes, D., & Andersson, D. I. (2011). Selection of Resistant Bacteria at Very Low Antibiotic Concentrations. *PLoS Pathogens*, 7(7), e1002158. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002158>

Guo, Q., Zhou, C., Ma, Z., & Yang, X. (2019). Fundamentals of TiO₂ Photocatalysis: Concepts, Mechanisms, and Challenges. *Advanced Materials*, 31(50), 1901997. <https://doi.org/10.1002/adma.201901997>

Gupta, S. M., & Tripathi, M. (2011). A review of TiO₂ nanoparticles. *Chinese Science Bulletin*, 56(16), 1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4476-1>

Gutiérrez-Cogco, L., Montiel-Vázquez, E., Aguilera-Pérez, P., & González-Andrade, M. D. C. (2000). Serotipos de Salmonella identificados en los servicios de salud de México. *Salud Pública de México*, 42(6). <https://doi.org/10.1590/s0036-36342000000600004>

Hassan, M. S., Amna, T., Al-Deyab, S. S., Kim, H. C., Oh, T. H., & Khil, M. S. (2012). Toxicity of Ce₂O₃/TiO₂ composite nanofibers against *S. aureus* and *S. typhimurium*: A novel electrospun material for disinfection of food pathogens. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 415, 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.08.058>

Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. *Chemical Reviews*, 95(1), 69–96. <https://doi.org/10.1021/cr00033a004>

Jacob, J. M., John, M. S., Jacob, A., Abitha, P., Kumar, S. S., Rajan, R., Natarajan, S., & Pugazhendhi, A. (2019). Bactericidal coating of paper towels via sustainable biosynthesis of silver nanoparticles using *Ocimum sanctum* leaf extract. *Materials Research Express*, 6(4), 045401. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aafaed>

Kadariya, J., Smith, T. C., & Thapaliya, D. (2014). Staphylococcus aureus and Staphylococcal Food-Borne Disease: An Ongoing Challenge in Public Health. *BioMed Research International*, 2014, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/827965>

Kato, S., & Mashio, F. (1964). Titanium Dioxide-Photocatalyzed Liquid Phase Oxidation of Tetralin. *The Journal of the Society of Chemical Industry, Japan*, 67(8), 1136–1140. https://doi.org/10.1246/nikkashi1898.67.8_1136

Kennedy, J., Jones, W., Morgan, D. J., Bowker, M., Lu, L., Kiely, C. J., Wells, P. P., & Dimitratos, N. (2014). Photocatalytic hydrogen production by reforming of methanol using Au/TiO₂, Ag/TiO₂ and Au-Ag/TiO₂ catalysts. *Catalysis, Structure & Reactivity*, 1(1), 35–43. <https://doi.org/10.1179/2055075814y.0000000006>

Khalil, I. A., Troeger, C., Blacker, B. F., Rao, P. C., Brown, A., Atherly, D. E., Brewer, T. G., Engmann, C. M., Houpt, E. R., Kang, G., Kotloff, K. L., Levine, M. M., Luby,

S. P., MacLennan, C. A., Pan, W. K., Pavlinac, P. B., Platts-Mills, J. A., Qadri, F., Riddle, M. S., . . . Reiner, R. C. (2018). Morbidity and mortality due to shigella and enterotoxigenic *Escherichia coli* diarrhoea: the Global Burden of Disease Study 1990–2016. *The Lancet Infectious Diseases*, *18*(11), 1229–1240. [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(18\)30475-4](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(18)30475-4)

Khamdahsag, P., Khemthong, P., Sitthisuwannakul, K., Grisdanurak, N., Wutikhun, T., Rungnim, C., Namuangruk, S., & Pimpha, N. (2018). Insights into binding mechanism of silver/titanium dioxide composites for enhanced elemental mercury capture. *Materials Chemistry and Physics*, *215*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.103>

Khan, S. U. M. (2002). Efficient Photochemical Water Splitting by a Chemically Modified n-TiO₂. *Science*, *297*(5590), 2243–2245. <https://doi.org/10.1126/science.1075035>

Khorrani, S., Zarrabi, A., Khaleghi, M., Danaei, M., & Mozafari, M. (2018). Selective cytotoxicity of green synthesized silver nanoparticles against the MCF-7 tumor cell line and their enhanced antioxidant and antimicrobial properties. *International Journal of Nanomedicine*, *Volume 13*, 8013–8024. <https://doi.org/10.2147/ijn.s189295>

Kimura, A. C., Johnson, K., Palumbo, M. S., Hopkins, J., Boase, J. C., Reporter, R., Goldoft, M., Stefonek, K. R., Farrar, J. A., van Gilder, T. J., & Vugia, D. J. (2004). Multistate Shigellosis Outbreak and Commercially Prepared Food, United States. *Emerging Infectious Diseases*, *10*(6), 1147–1149. <https://doi.org/10.3201/eid1006.030599>

Klasen, H. (2000a). A historical review of the use of silver in the treatment of burns. II. Renewed interest for silver. *Burns*, *26*(2), 131–138. [https://doi.org/10.1016/s0305-4179\(99\)00116-3](https://doi.org/10.1016/s0305-4179(99)00116-3)

Klasen, H. (2000b). Historical review of the use of silver in the treatment of burns. I. Early uses. *Burns*, *26*(2), 117–130. [https://doi.org/10.1016/s0305-4179\(99\)00108-4](https://doi.org/10.1016/s0305-4179(99)00108-4)

- Klevens, R. M. (2007). Invasive Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Infections in the United States. *JAMA*, 298(15), 1763. <https://doi.org/10.1001/jama.298.15.1763>
- Kotloff, K. L., Riddle, M. S., Platts-Mills, J. A., Pavlinac, P., & Zaidi, A. K. M. (2018). Shigellosis. *The Lancet*, 391(10122), 801–812. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(17\)33296-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(17)33296-8)
- Krishnamoorthy, K., Veerapandian, M., Zhang, L. H., Yun, K., & Kim, S. J. (2014). Surface chemistry of cerium oxide nanocubes: Toxicity against pathogenic bacteria and their mechanistic study. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), 3513–3517. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.12.043>
- Kümmerer, K. (2009a). Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part I. *Chemosphere*, 75(4), 417–434. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>
- Kümmerer, K. (2009b). Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part II. *Chemosphere*, 75(4), 435–441. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.12.006>
- Lateef, A., Azeez, M. A., Asafa, T. B., Yekeen, T. A., Akinboro, A., Oladipo, I. C., Azeez, L., Ajibade, S. E., Ojo, S. A., Gueguim-Kana, E. B., & Beukes, L. S. (2016). Biogenic synthesis of silver nanoparticles using a pod extract of *Cola nitida*: Antibacterial and antioxidant activities and application as a paint additive. *Journal of Taibah University for Science*, 10(4), 551–562. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.10.010>
- le Ouay, B., & Stellacci, F. (2015). Antibacterial activity of silver nanoparticles: A surface science insight. *Nano Today*, 10(3), 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.002>
- Lee, L. A., Ostroff, S. M., McGee, H. B., Johnson, D. R., Downes, F. P., Cameron, D. N., Bean, N. H., & Griffin, P. M. (1991). An Outbreak of Shigellosis at an Outdoor Music Festival. *American Journal of Epidemiology*, 133(6), 608–615. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a115933>

Li, L., Li, L., Zhou, X., Yu, Y., Li, Z., Zuo, D., & Wu, Y. (2019). Silver nanoparticles induce protective autophagy via Ca²⁺/CaMKK β /AMPK/mTOR pathway in SH-SY5Y cells and rat brains. *Nanotoxicology*, 13(3), 369–391. <https://doi.org/10.1080/17435390.2018.1550226>

Li, X., Qi, M., Sun, X., Weir, M. D., Tay, F. R., Oates, T. W., Dong, B., Zhou, Y., Wang, L., & Xu, H. H. (2019). Surface treatments on titanium implants via nanostructured ceria for antibacterial and anti-inflammatory capabilities. *Acta Biomaterialia*, 94, 627–643. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.06.023>

Liao, C., Li, Y., & Tjong, S. (2019). Bactericidal and Cytotoxic Properties of Silver Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(2), 449. <https://doi.org/10.3390/ijms20020449>

Liou, J. W., & Chang, H. H. (2012). Bactericidal Effects and Mechanisms of Visible Light-Responsive Titanium Dioxide Photocatalysts on Pathogenic Bacteria. *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*, 60(4), 267–275. <https://doi.org/10.1007/s00005-012-0178-x>

Manjunath, K., Reddy Yadav, L. S., Jayalakshmi, T., Reddy, V., Rajanaika, H., & Nagaraju, G. (2018). Ionic liquid assisted hydrothermal synthesis of TiO₂ nanoparticles: photocatalytic and antibacterial activity. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(1), 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.02.001>

Matsunaga, T., Tomoda, R., Nakajima, T., & Wake, H. (1985). Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders. *FEMS Microbiology Letters*, 29(1–2), 211–214. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1985.tb00864.x>

McDonnell, G., & Russell, A. D. (1999). Antiseptics and Disinfectants: Activity, Action, and Resistance. *Clinical Microbiology Reviews*, 12(1), 147–179. <https://doi.org/10.1128/cmr.12.1.147>

McLintock, S., & Ritchie, M. (1965). photoadsorption and oxidation of ethylene and propylene. *Trans Faraday Soc*, 61, 1007–1016. <https://www.mendeley.com/catalogue/690dd681-ebf0-3eb9-96bc-65605d8bcc9f/>

Mead, P. S., Slutsker, L., Dietz, V., McCaig, L. F., Bresee, J. S., Shapiro, C., Griffin, P. M., & Tauxe, R. V. (1999). Food-Related Illness and Death in the United States. *Emerging Infectious Diseases*, 5(5), 607–625. <https://doi.org/10.3201/eid0505.990502>

Mei, S., Wang, H., Wang, W., Tong, L., Pan, H., Ruan, C., Ma, Q., Liu, M., Yang, H., Zhang, L., Cheng, Y., Zhang, Y., Zhao, L., & Chu, P. K. (2014). Antibacterial effects and biocompatibility of titanium surfaces with graded silver incorporation in titania nanotubes. *Biomaterials*, 35(14), 4255–4265. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.02.005>

Meikle, T. G., Dyett, B. P., Strachan, J. B., White, J., Drummond, C. J., & Conn, C. E. (2020). Preparation, Characterization, and Antimicrobial Activity of Cubosome Encapsulated Metal Nanocrystals. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(6), 6944–6954. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b21783>

Mills, A., & le Hunte, S. (1997). An overview of semiconductor photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 108(1), 1–35. [https://doi.org/10.1016/s1010-6030\(97\)00118-4](https://doi.org/10.1016/s1010-6030(97)00118-4)

Mohiti-Asli, M., Pourdeyhimi, B., & Lobo, E. G. (2014). Novel, silver-ion-releasing nanofibrous scaffolds exhibit excellent antibacterial efficacy without the use of silver nanoparticles. *Acta Biomaterialia*, 10(5), 2096–2104. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.12.024>

Montini, T., Melchionna, M., Monai, M., & Fornasiero, P. (2016). ChemInform Abstract: Fundamentals and Catalytic Applications of CeO₂-Based Materials. *ChemInform*, 47(30). <https://doi.org/10.1002/chin.201630248>

Moongraksathum, B., & Chen, Y. W. (2018a). Anatase TiO₂ co-doped with silver and ceria for antibacterial application. *Catalysis Today*, 310, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.05.087>

Moongraksathum, B., & Chen, Y. W. (2018b). Anatase TiO₂ co-doped with silver and ceria for antibacterial application. *Catalysis Today*, 310, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.05.087>

Moulson, A. J., & Herbert, J. M. (1992). *Electroceramics: Materials Properties Applications* (1.^a ed.). Chapman & Hall.

Muller, U. (2006). Inorganic Structural Chemistry. En *Inorganic Structural Chemistry* (2nd ed., pp. 57–58). Wiley. <https://www.redalyc.org/pdf/430/43016342003.pdf>

Murtada, K., de Andrés, F., Zougagh, M., & Ríos, N. (2019). Strategies for antidepressants extraction from biological specimens using nanomaterials for analytical purposes: A review. *Microchemical Journal*, 150, 104193. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104193>

Muthuirulandi Sethuvel, D., Devanga Ragupathi, N., Anandan, S., & Veeraraghavan, B. (2016). Update on: Shigella new serogroups/serotypes and their antimicrobial resistance. *Letters in Applied Microbiology*, 64(1), 8–18. <https://doi.org/10.1111/lam.12690>

NAIMI, T. S., WICKLUND, J. H., OLSEN, S. J., KRAUSE, G., WELLS, J. G., BARTKUS, J. M., BOXRUD, D. J., SULLIVAN, M., KASSENBERG, H., BESSER, J. M., MINTZ, E. D., OSTERHOLM, M. T., & HEDBERG, C. W. (2003). Concurrent Outbreaks of *Shigella sonnei* and Enterotoxigenic *Escherichia coli* Infections Associated with Parsley: Implications for Surveillance and Control of Foodborne Illness†. *Journal of Food Protection*, 66(4), 535–541. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-66.4.535>

Nataro, J. P., & Kaper, J. B. (1998). Diarrheagenic *Escherichia coli*. *Clinical Microbiology Reviews*, 11(1), 142–201. <https://doi.org/10.1128/cmr.11.1.142>

Nigussie, G. Y., Tesfamariam, G. M., Tegegne, B. M., Weldemichel, Y. A., Gebreab, T. W., Gebrehiwot, D. G., & Gebremichel, G. E. (2018). Antibacterial Activity of Ag-Doped TiO₂ and Ag-Doped ZnO Nanoparticles. *International Journal of Photoenergy*, 2018, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/5927485>

Niyogi, S. (2007). Increasing antimicrobial resistance—an emerging problem in the treatment of shigellosis. *Clinical Microbiology and Infection*, 13(12), 1141–1143. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2007.01829.x>

Novo, A., André, S., Viana, P., Nunes, O. C., & Manaia, C. M. (2013). Antibiotic resistance, antimicrobial residues and bacterial community composition in urban wastewater. *Water Research*, 47(5), 1875–1887. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.010>

Ochoa, Y., Ortegón, Y., & Rodríguez Páez, J. E. (2010). Synthesis of TiO₂, anatase phase by the sol-gel method: study of the effect of the presence of AcacH in the system. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 29–40. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n52/n52a03.pdf>

Opal, S. M., & Glück, T. (2003). Endotoxin as a drug target. *Critical Care Medicine*, 31(Supplement), S57-S64. <https://doi.org/10.1097/00003246-200301001-00009>

Opoku, F., Govender, K. K., van Sittert, C. G. C. E., & Govender, P. P. (2017). Recent Progress in the Development of Semiconductor-Based Photocatalyst Materials for Applications in Photocatalytic Water Splitting and Degradation of Pollutants. *Advanced Sustainable Systems*, 1(7), 1700006. <https://doi.org/10.1002/adsu.201700006>

Oves, M., Aslam, M., Rauf, M. A., Qayyum, S., Qari, H. A., Khan, M. S., Alam, M. Z., Tabrez, S., Pugazhendhi, A., & Ismail, I. M. (2018). Antimicrobial and anticancer activities of silver nanoparticles synthesized from the root hair extract of *Phoenix dactylifera*. *Materials Science and Engineering: C*, 89, 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.03.035>

Pant, B., Barakat, N. A., Pant, H. R., Park, M., Saud, P. S., Kim, J. W., & Kim, H. Y. (2014). Synthesis and photocatalytic activities of CdS/TiO₂ nanoparticles supported on carbon nanofibers for high efficient adsorption and simultaneous decomposition of organic dyes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 434, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.07.039>

Pant, B., Park, M., Kim, H. Y., & Park, S. J. (2016). Ag-ZnO photocatalyst anchored on carbon nanofibers: Synthesis, characterization, and photocatalytic activities. *Synthetic Metals*, 220, 533–537. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2016.07.027>

Pant, B., Park, M., & Park, S. J. (2019). Hydrothermal synthesis of Ag₂CO₃-TiO₂ loaded reduced graphene oxide nanocomposites with highly efficient photocatalytic activity. *Chemical Engineering Communications*, 207(5), 688–695. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1615470>

Park, C. H., Zhang, S. B., & Wei, S. H. (2002). Origin of p-type doping difficulty in ZnO: The impurity perspective. *Physical Review B*, 66(7). <https://doi.org/10.1103/physrevb.66.073202>

Pérez Martínez, Imperio A. (2015) Síntesis de nanoestructuras a base de TiO₂ obtenidas por el método hidrotérmico asistido con microondas [Tesis no publicada de maestría]. Instituto Potosino de investigación científica y tecnológica A.C..32-35

Pisal, V., Wakchaure, P., Patil, N., & Bhagwat, S. (2019). Green synthesized CeO₂ quantum dots: a study of its antimicrobial potential. *Materials Research Express*, 6(11), 115409. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4fa5>

Porrero, M. C., Valverde, A., Fernández-Llario, P., Díez-Guerrier, A., Mateos, A., Lavín, S., Cantón, R., Fernández-Garayzabal, J. F., & Domínguez, L. (2014). Staphylococcus aureus Carrying mecC Gene in Animals and Urban Wastewater, Spain. *Emerging Infectious Diseases*, 20(5), 899–901. <https://doi.org/10.3201/eid2005.130426>

Pujar, M. S., Hunagund, S. M., Barretto, D. A., Desai, V. R., Patil, S., Vootla, S. K., & Sidarai, A. H. (2019). Synthesis of cerium-oxide NPs and their surface morphology effect on biological activities. *Bulletin of Materials Science*, 43(1). <https://doi.org/10.1007/s12034-019-1962-6>

Ramkumar, V. S., Pugazhendhi, A., Gopalakrishnan, K., Sivagurunathan, P., Saratale, G. D., Dung, T. N. B., & Kannapiran, E. (2017). Biofabrication and characterization of silver nanoparticles using aqueous extract of seaweed

Enteromorpha compressa and its biomedical properties. *Biotechnology Reports*, 14, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.02.001>

Saeed, A., Abd, H., Edvinsson, B., & Sandström, G. (2008). Acanthamoeba castellanii an environmental host for Shigella dysenteriae and Shigella sonnei. *Archives of Microbiology*, 191(1), 83–88. <https://doi.org/10.1007/s00203-008-0422-2>

Samuel, M. S., Jose, S., Selvarajan, E., Mathimani, T., & Pugazhendhi, A. (2020). Biosynthesized silver nanoparticles using Bacillus amyloliquefaciens; Application for cytotoxicity effect on A549 cell line and photocatalytic degradation of p-nitrophenol. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 202, 111642. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111642>

Saravanan, M., Arokiyaraj, S., Lakshmi, T., & Pugazhendhi, A. (2018). Synthesis of silver nanoparticles from Phenerochaete chrysosporium (MTCC-787) and their antibacterial activity against human pathogenic bacteria. *Microbial Pathogenesis*, 117, 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.02.008>

Saravanan, M., Barik, S. K., MubarakAli, D., Prakash, P., & Pugazhendhi, A. (2018). Synthesis of silver nanoparticles from Bacillus brevis (NCIM 2533) and their antibacterial activity against pathogenic bacteria. *Microbial Pathogenesis*, 116, 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.01.038>

Saravanan, R., Manoj, D., Qin, J., Naushad, M., Gracia, F., Lee, A. F., Khan, M. M., & Gracia-Pinilla, M. (2018). Mechanochemical synthesis of Ag/TiO₂ for photocatalytic methyl orange degradation and hydrogen production. *Process Safety and Environmental Protection*, 120, 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.015>

Sarwari, A., Magder, L., Levine, P., McNamara, A., Knowler, S., Armstrong, G., Etzel, R., Hollingsworth, J., & Morris, Jr., J. (2001). Serotype Distribution of Salmonella Isolates from Food Animals after Slaughter Differs from That of Isolates

Found in Humans. *The Journal of Infectious Diseases*, 183(8), 1295–1299. <https://doi.org/10.1086/319671>

Savage, R. A. (1995). Hazard analysis critical control point: A review. *Food Reviews International*, 11(4), 575–595. <https://doi.org/10.1080/87559129509541062>

Sclafani, A., Mozzanega, M. N., & Herrmann, J. M. (1997). Influence of Silver Deposits on the Photocatalytic Activity of Titania. *Journal of Catalysis*, 168(1), 117–120. <https://doi.org/10.1006/jcat.1997.1631>

Seery, M. K., George, R., Floris, P., & Pillai, S. C. (2007). Silver doped titanium dioxide nanomaterials for enhanced visible light photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 189(2–3), 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2007.02.010>

Shaheen, H. I., Khalil, S. B., Rao, M. R., Abu Elyazeed, R., Wierzba, T. F., Peruski, L. F., Putnam, S., Navarro, A., Morsy, B. Z., Cravioto, A., Clemens, J. D., Svennerholm, A. M., & Savarino, S. J. (2004). Phenotypic Profiles of Enterotoxigenic *Escherichia coli* Associated with Early Childhood Diarrhea in Rural Egypt. *Journal of Clinical Microbiology*, 42(12), 5588–5595. <https://doi.org/10.1128/jcm.42.12.5588-5595.2004>

Shanmuganathan, R., MubarakAli, D., Prabakar, D., Muthukumar, H., Thajuddin, N., Kumar, S. S., & Pugazhendhi, A. (2017). An enhancement of antimicrobial efficacy of biogenic and ceftriaxone-conjugated silver nanoparticles: green approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(11), 10362–10370. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9367-9>

Shepherd, J. G., Wang, L., & Reeves, P. R. (2000). Comparison of O-Antigen Gene Clusters of *Escherichia coli* (*Shigella*) *Sonnei* and *Plesiomonas shigelloides* O17: *Sonnei* Gained Its Current Plasmid-Borne O-Antigen Genes from *P. shigelloides* in a Recent Event. *Infection and Immunity*, 68(10), 6056–6061. <https://doi.org/10.1128/iai.68.10.6056-6061.2000>

SIDHU, J., & TOZE, S. (2009). Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review. *Environment International*, 35(1), 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.006>

Soge, O. O., Meschke, J. S., No, D. B., & Roberts, M. C. (2009). Characterization of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and methicillin-resistant coagulase-negative *Staphylococcus* spp. isolated from US West Coast public marine beaches. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 64(6), 1148–1155. <https://doi.org/10.1093/jac/dkp368>

Somorjai, G. A. (1996). Modern Surface Science and Surface Technologies: An Introduction. *Chemical Reviews*, 96(4), 1223–1236. <https://doi.org/10.1021/cr950234e>

Sonawane, R. S., Kale, B. B., & Dongare, M. K. (2004). Preparation and photocatalytic activity of Fe-TiO₂ thin films prepared by sol-gel dip coating. *Materials Chemistry and Physics*, 85(1), 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2003.12.007>

Sun, Z., Fan, C., Tang, X., Zhao, J., Song, Y., Shao, Z., & Xu, L. (2016). Characterization and antibacterial properties of porous fibers containing silver ions. *Applied Surface Science*, 387, 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.015>

Sung-Suh, H. M., Choi, J. R., Hah, H. J., Koo, S. M., & Bae, Y. C. (2004). Comparison of Ag deposition effects on the photocatalytic activity of nanoparticulate TiO₂ under visible and UV light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 163(1–2), 37–44. [https://doi.org/10.1016/s1010-6030\(03\)00428-3](https://doi.org/10.1016/s1010-6030(03)00428-3)

Swoboda, J. G., Campbell, J., Meredith, T. C., & Walker, S. (2010). ChemInform Abstract: Wall Teichoic Acid Function, Biosynthesis, and Inhibition. *ChemInform*, 41(12). <https://doi.org/10.1002/chin.201012263>

Taneja, N., & Mewara, A. (2016). Shigellosis: Epidemiology in India. *Indian Journal of Medical Research*, 143(5), 565. <https://doi.org/10.4103/0971-5916.187104>

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Eddy, M., Stensel, H. D., & Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering*. McGraw-Hill Education.

Thompson, J., Gündoğdu, A., Stratton, H., & Katouli, M. (2012). Antibiotic resistant *Staphylococcus aureus* in hospital wastewaters and sewage treatment plants with special reference to methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). *Journal of Applied Microbiology*, 114(1), 44–54. <https://doi.org/10.1111/jam.12037>

Tolba, O., Loughrey, A., Goldsmith, C. E., Millar, B. C., Rooney, P. J., & Moore, J. E. (2008). Survival of epidemic strains of healthcare (HA-MRSA) and community-associated (CA-MRSA) methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in river-, sea- and swimming pool water. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211(3–4), 398–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.06.003>

Tortora, G. J., Funke, B. R., & Case, C. L. (2017). *Introducción a la microbiología: Uso de sustancias psicoactivas y presentaciones clínicas de la enfermedad adictiva* (1.ª ed.). Editorial Médica Panamericana.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2005). *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2005(16), 726–737. <https://doi.org/10.2175/193864705783867675>

Valdespino-Gomez JL, García-García ML, Del Rio-Zolezzi A, et al. (1994). Epidemiology and etiology of infectious diarrheas. The case of Mexico. *Revista Latinoamericana de Microbiología*. 1994 Oct-Dec;36(4):307-324.

Villicaaa-MMndez, M., Orozco-Gonzalez, M., Apolinar Cortts, J., & Garnica-Romo, M. G. (2017). Transiciones de Fases cristalinas en fotocatalizadores de TiO₂-Fe al Incorporar el Fe en forma de Magnetita por Microondas (Transitions of Crystalline Phases and Photocatalysts of TiO₂-Fe When Incorporating the Form in Magnetite

by Microwave). *SSRN Electronic Journal*. Published.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3113776>

Wan, M. T., & Chou, C. C. (2014). Spreading of β -lactam resistance gene (*mecA*) and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* through municipal and swine slaughterhouse wastewaters. *Water Research*, 64, 288–295.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.014>

Watson, J., Jenkins, C., & Clements, A. (2018). *Shigella sonnei* Does Not Use Amoebae as Protective Hosts. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(9).
<https://doi.org/10.1128/aem.02679-17>

Weintraub, A. (2007). Enteroaggregative *Escherichia coli*: epidemiology, virulence and detection. *Journal of Medical Microbiology*, 56(1), 4–8.
<https://doi.org/10.1099/jmm.0.46930-0>

Wertheim, H. F., Melles, D. C., Vos, M. C., van Leeuwen, W., van Belkum, A., Verbrugh, H. A., & Nouwen, J. L. (2005). The role of nasal carriage in *Staphylococcus aureus* infections. *The Lancet Infectious Diseases*, 5(12), 751–762.
[https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(05\)70295-4](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(05)70295-4)

Xu, H., Qu, Z., Zong, C., Quan, F., Mei, J., & Yan, N. (2016). Catalytic oxidation and adsorption of Hg⁰ over low-temperature NH₃-SCR LaMnO₃ perovskite oxide from flue gas. *Applied Catalysis B: Environmental*, 186, 30–40.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.12.042>

Yamahara, K. M., Sassoubre, L. M., Goodwin, K. D., & Boehm, A. B. (2012). Occurrence and Persistence of Bacterial Pathogens and Indicator Organisms in Beach Sand along the California Coast. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(6), 1733–1745. <https://doi.org/10.1128/aem.06185-11>

Ye, L., & Zhang, T. (2011). Pathogenic Bacteria in Sewage Treatment Plants as Revealed by 454 Pyrosequencing. *Environmental Science & Technology*, 45(17), 7173–7179. <https://doi.org/10.1021/es201045e>

Yu, J. C., Ho, W., Yu, J., Yip, H., Wong, P. K., & Zhao, J. (2005). Efficient Visible-Light-Induced Photocatalytic Disinfection on Sulfur-Doped Nanocrystalline Titania. *Environmental Science & Technology*, 39(4), 1175–1179. <https://doi.org/10.1021/es035374h>

Zaidi, M. B., McDermott, P. F., Fedorka-Cray, P., Leon, V., Canche, C., Hubert, S. K., Abbott, J., León, M., Zhao, S., Headrick, M., & Tollefson, L. (2006). Nontyphoidal Salmonella from Human Clinical Cases, Asymptomatic Children, and Raw Retail Meats in Yucatan, Mexico. *Clinical Infectious Diseases*, 42(1), 21–28. <https://doi.org/10.1086/498508>

APENDICE 1. COSTOS DEL MATERIAL

Reactivo	Costo/grs de reactivo	g empleados/g material	Costo real, \$
Butóxido de titanio	\$2000, 500 g	5	20
Nitrato cerico amónico	\$1500, 500 g	0.16	0.6
Nitrato de plata	\$2000, 500 g	0.03	0.2
Agua desionizada	\$200, 20000g	0.05	0.1
Etanol	\$620, 10000 g	0.03	0.2
Costo total por gramo de material			21.1

En la tabla, se presentan los costos de los materiales utilizados para la síntesis del material cotizados al 15 de junio de 2021, dicho costo no incluye el gasto energético, simplemente es un aproximado.