

**Aplicación de la fotocatalisis heterogénea en la eliminación de bacterias entéricas presentes
en afluentes del Alto Chicamocha en Boyacá**

Julieth Catalina Fonseca Ramírez

Directora trabajo de grado:

MsC. Mónica Sirley Hernández Laverde

Co-Directora trabajo de grado:

Dra. Julie Joseane Murcia Mesa

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Tecnología e Ingeniería

Ingeniería de Alimentos

2024

MsC. Mónica Sirley Hernández Laverde
Directora trabajo de grado
Docente Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Dra. Julie Joseane Murcia Mesa
Co-Directora trabajo de grado
Docente Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC

Jurado

Jurado

Dedicatoria

Quiero expresar infinitas gracias a Dios, por concederme la bendición de culminar esta meta que siempre añoré y que hoy es un hecho, por otorgarme la sabiduría suficiente para cursar mi carrera soñada. A mi familia, por estar siempre presente en mi trayectoria y no dejarme desfallecer. A mis amigas, por brindarme su ayuda y su compañía cuando más lo requerí. A mi novio Diego, por sus mensajes de aliento y su colaboración.

Esta meta se la dedico a mis padres César y Carmenza, quienes con su incesante esfuerzo y sacrificio que a diario empeñan en mí, han logrado impulsarme para alcanzar mis metas. A mi hermano Andrés, por su presencia y por crecer conmigo. A todas las personas que de alguna u otra manera aportaron y estuvieron presentes en mi formación académica. Todos mis reconocimientos siempre serán para Dios, por las inmensas bondades y oportunidades otorgadas. Asimismo, este logro me lo dedico a mí misma por todas las batallas y resiliencia que tuve que enfrentar en todo el proceso para llegar hasta aquí. Finalmente, se lo dedico a mi amiga Yudy, que desde el cielo me acompaña y celebra mis triunfos.

Agradecimientos

Muchas gracias a la MsC. Mónica Hernández, por su tiempo, paciencia, por compartirnos su conocimiento y ser obstinada para luchar por adquirir las herramientas para efectuar el proyecto de investigación. A la Dra. Julie Murcia, por su entrega, disposición y por abrirnos las puertas del laboratorio en la UPTC, por prestarnos sus instalaciones. Al Grupo de Investigación Agroalimentaria de la UNAD GIA-UNAD con su semillero VITAL, al grupo de investigación de Catálisis de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia con su línea de Investigación de Fotocatálisis, al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (Min ciencias), Ministerio de Salud y protección social por la financiación del proyecto 110991891727, y al convenio interinstitucional 007 entre la UPTC y la UNAD por facilitar los recursos para el desarrollo de la presente investigación. Finalmente, extendiendo mis agradecimientos a la UNAD, por formarme como profesional integral y facilitarme las herramientas y acceso en una educación competitiva.

Resumen

El agua utilizada para el riego de cultivos en la zona rural del municipio de Firavitoba, en el departamento de Boyacá contiene una elevada carga de bacterias entéricas que pueden generar problemas de salud pública, dando lugar a enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs) y enfermedad diarreica aguda (EDA). Por esta razón, en la presente investigación se empleó la fotocatalisis heterogénea como una metodología eficiente en la eliminación de bacterias. Las muestras de agua a tratar fueron tomadas del afluente del Alto Chicamocha. El proyecto se desarrolló a través de cuatro etapas que comprenden la síntesis de los fotocatalizadores, su caracterización, la toma de muestras del afluente y la evaluación de la actividad de los materiales fotocatalíticos en la eliminación de *E. coli*, coliformes totales y otras enterobacterias.

La síntesis de los materiales fotocatalíticos se realizó por el método hidrotérmal asistido por microondas, y la modificación se llevó a cabo mediante la fotodeposición de metales nobles sobre la superficie del $\text{TiO}_2(\text{F})$, utilizando plata (Ag) y oro (Au) en dos proporciones 0.125% y 0.25%, con el propósito de obtener materiales con mayor fotoactividad en el rango de la luz visible, para su uso en la eliminación de microorganismos patógenos. La caracterización se realizó utilizando técnicas, como la Difracción de rayos X (DRX), la Espectrofotometría Ultravioleta-Visible de Reflectancia Difusa (UV-Vis DRS), Fisisorción de Nitrógeno y Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) para analizar las características estructurales, morfológicas y superficiales de los materiales sintetizados. El fotocatalizador que presentó eliminación total de *E. coli* fue el $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.25%), atribuido al efecto sinérgico del fotocatalizador y la acción de las nanopartículas de Ag, al inhibir el crecimiento y causar la muerte de la bacteria. La modificación del TiO_2 con metales nobles condujo a mejorar las propiedades fotoquímicas al actuar como trampas de electrones, evitando la recombinación del

par electrón-hueco, reduciendo el ancho de banda o agregando nuevos niveles de energía para absorber la luz visible. Sin embargo, debido a la resistencia intrínseca por las propiedades bacterianas de inactivación y al mecanismo de bloqueo por parte de los coliformes totales y otras enterobacterias, no fue posible su eliminación total.

Palabras clave: Fotocatálisis, Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETAs), Enfermedad Diarreica Aguda (EDA), *E. coli*, TiO₂.

Abstract

The water used for crop irrigation in the rural area of the municipality of Firavitoba, in the department of Boyacá, contains a high load of enteric bacteria that can lead to public health problems, resulting in foodborne illnesses (FBI) and acute diarrheal disease (ADD). For this reason, heterogeneous photocatalysis was employed in the present research as an efficient methodology for bacteria removal. Water samples to be treated were taken from the Alto Chicamocha tributary. The project was developed through four stages comprising the synthesis of photocatalysts, their characterization, sampling of the tributary, and evaluation of the activity of photocatalytic materials in the elimination of *E. coli*, total coliforms, and other enterobacteria. The synthesis of photocatalytic materials was carried out using the microwave-assisted hydrothermal method, and modification was performed by the photo deposition of noble metals on the surface of $\text{TiO}_2(\text{F})$, using silver (Ag) and gold (Au) in two proportions, 0.125% and 0.25%, with the purpose of obtaining materials with higher photoactivity in the visible light range for their use in the elimination of pathogenic microorganisms. Characterization was conducted using techniques such as X-ray Diffraction (XRD), Diffuse Reflectance Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-Vis DRS), Nitrogen Physisorption, and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to analyze the structural, morphological, and surface characteristics of the synthesized materials. The photocatalyst that showed complete elimination of *E. coli* was $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.25%), attributed to the synergistic effect of the photocatalyst and the action of Ag nanoparticles, inhibiting growth and causing bacterial death. The modification of TiO_2 with noble metals led to improvements in photochemical properties by acting as electron traps, preventing the recombination of the electron-hole pair, reducing the bandgap, or adding new energy levels to absorb visible light. However, due to the intrinsic resistance posed by the

bacterial inactivation properties and the blocking mechanism by total coliforms and other enterobacteria, total elimination was not achievable.

Keywords: Photocatalysis, Foodborne Illnesses (FBI), Acute Diarrheal Disease (ADD), *E. coli*, TiO₂.

Tabla de Contenido

Introducción	14
Planteamiento del problema.....	16
Justificación	18
Objetivos.....	20
Objetivo General	20
Objetivos específicos	20
Marco teórico	21
Tecnologías Avanzadas de Oxidación	21
Fotocatálisis heterogénea	21
El fotocatalizador	22
Parámetros que afectan el desempeño fotocatalítico	26
Efecto bactericida de la fotocatalisis	27
Efecto bactericida de la luz	28
Contaminación en afluentes del Alto Chicamocha	28
Marco conceptual.....	31
Microorganismos patógenos	31
Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETAs)	31
Tipos de ETAs	32
Enfermedad Diarreica Aguda (EDA)	33
Desinfección	34
Esterilización	34
Tratamiento de aguas residuales	34

	10
Reciclado de aguas residuales.....	35
Metodología	36
Primera etapa: Síntesis de fotocatalizadores	37
Modificación del fotocatalizador TiO ₂ (F) por reducción fotoquímica de metales nobles.....	37
Segunda etapa: Caracterización fisicoquímica de los fotocatalizadores.....	38
Tercera etapa: Toma de muestras de agua	39
Cuarta etapa: Evaluación de la actividad fotocatalítica	40
Reacción blanco	40
Análisis fisicoquímico de las muestras	40
Análisis microbiológico de las muestras	41
Resultados	42
Caracterización fisicoquímica de los fotocatalizadores	42
Evaluación de la actividad de los materiales fotocatalíticos	48
Reacción blanco	49
Actividad fotocatalítica en el tratamiento de agua del afluente del Alto Chicamocha	50
Conclusiones	56
Recomendaciones	57
Referencias bibliográficas.....	58
Apéndices.....	72

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Resultados de caracterización de los fotocatalizadores</i>	43
Tabla 2 <i>Análisis de varianza ANOVA</i>	48
Tabla 3 <i>Parámetros fisicoquímicos de calidad del agua antes y después de los tratamientos fotocatalíticos</i>	51

Lista de Figuras

Figura 1 Estructuras cristalinas del fotocatalizador TiO_2 : a) Anatasa b) Rutilo c) Brookita	23
Figura 2 Mecanismo fotocatalítico del TiO_2	25
Figura 3 Mecanismo de acción de TiO_2 sobre los microorganismos patógenos	28
Figura 4 Mapa hidrográfico de Firavitoba, ubicación del afluente del Alto Chicamocha donde se tomaron las muestras	29
Figura 5 Patrones de difracción de rayos-X de los fotocatalizadores	42
Figura 6 Espectros UV-Vis DRS de los fotocatalizadores	45
Figura 7 Distribución de los grupo hidroxilo superficiales presentes en el TiO_2	47
Figura 8 Espectros FTIR de los fotocatalizadores sintetizados	48
Figura 9 Población de bacterias antes y después de los diferentes tratamientos fotocatalíticos.	50
Figura 10 Colonias de bacterias en cajas de Petri de la muestra de agua del Río Chicamocha	53
Figura 11 Población de bacterias después de cada reúso del fotocatalizador $TiO_2(F)$ - Ag (0.25%).....	54

Lista de apéndices

Apéndice A <i>Presentación de póster en el International Meeting of the Faculty of Sciences-IMFaS-2023. UPTC Tunja, 04 octubre 2023.....</i>	72
Apéndice B <i>Certificado ponencia en el International Meeting of the Faculty of Sciences-IMFaS-2023. UPTC Tunja, 04 octubre 2023.....</i>	73
Apéndice C. <i>Preparación de Artículo científico</i>	74

Introducción

Según la (Organización de Naciones Unidas [ONU], 2020), más del 80% de las aguas residuales generadas por actividades humanas se vierten en los ríos sin ningún tratamiento previo, provocando su contaminación. Sin embargo, se espera reducir el porcentaje de aguas residuales no tratadas para el año 2030. Por otro lado, las tecnologías convencionales de tratamiento de agua residual se aplican para la eliminación de contaminantes de tipo físico, químico o biológico. Dentro de estas tecnologías se encuentran los tratamientos biológicos, estos emplean microorganismos para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables en el agua (Oller et al., 2011). Es así como los procesos aeróbicos, presentan sistemas de operación tales como: procesos de lodos activos y cultivos fijos. Por otra parte, en los procesos anaeróbicos intervienen bacterias; tanto anaerobias estrictas como facultativas y, en ausencia de oxígeno, degradan los compuestos orgánicos produciendo metano y dióxido de carbono (Kitamura et al., 2005).

En los últimos años, se ha estudiado el empleo de Tecnologías Avanzadas de Oxidación (con su sigla en inglés AOTs), son tratamientos prometedores debido a su capacidad para destruir una gran variedad de contaminantes orgánicos, incluidas especies químicas recalcitrantes (Emilio et al., 2002). Según Glaze et al., (1987) las AOTs son procesos químicos en los que se generan radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) los cuales actúan como fuertes oxidantes, capaces de degradar una gran cantidad de contaminantes orgánicos. Los procesos más comunes son: la fotocátalisis heterogénea con TiO_2 , el proceso fenton y foto-fenton, el sistema UV/ H_2O_2 , la ozonización, y la electro-oxidación (Clemente et al., 2013). Además, permite el tratamiento de contaminantes en el agua, el aire, la eliminación de bacterias y la síntesis de productos de química fina. La fotocátalisis es una forma práctica de utilizar la energía de la luz solar o la iluminación interior artificial. El papel de la fotocátalisis consiste en iniciar o acelerar reacciones de reducción y

oxidación (redox) en presencia de un sólido semiconductor. Esta tecnología tiene diferentes ventajas como una fuerte resistencia a la foto corrosión, temperaturas de operación bajas; mínimo costo y bajo consumo de energía (Murcia, 2013). El proceso para la eliminación de bacterias patógenas se lleva a cabo cuando el TiO_2 absorbe radiación en el UV generando pares electrón/hueco, luego el oxígeno adsorbido se convierte en la especie aceptora de electrones, los huecos después de migrar a la superficie reaccionan con las sustancias adsorbidas, en particular con agua o con iones hidroxilo (OH^-), generando radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) los cuales generan estrés oxidativo en las células microbianas hasta su deterioro y muerte (Hernández, 2017).

Finalmente, el objetivo de esta investigación se centra en estudiar la efectividad de la fotocatalisis heterogénea en la eliminación de bacterias entéricas. Puesto que, el agua del afluyente del Alto Chicamocha se utiliza para la irrigación de vegetales, por lo que la alta carga de microorganismos patógenos representa un riesgo para la salud, ya que al consumir vegetales de hoja contaminados con bacterias puede generar casos de ETAs o EDA.

Planteamiento del problema

Las aguas superficiales residuales domésticas utilizadas para el riego de cultivos contienen una elevada carga de contaminantes orgánicos y microbiológicos que pueden generar problemas de salud pública; desencadenando en casos de ETAs y EDA, debido a la presencia de bacterias entéricas.

Más del 20% del agua de los departamentos de Colombia se destina para uso agrícola, siendo uno de los sectores más dependientes del líquido (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). En Colombia, el porcentaje de aguas residuales tratadas es del 52%; actualmente, se generan 2.126 millones de metros cúbicos de aguas residuales municipales al año y se estima que para el año 2050 esta cifra aumentará a 2.765 millones de metros cúbicos (Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones [ANDESCO], 2022). Por otro lado, a lo largo de la historia de la humanidad, se ha enfrentado al desafío de identificar y mantener un suministro de agua limpia para beber y darle otros usos, con el fin de evitar el desabastecimiento (Duran et al., 2006).

Consecuentemente, la descarga de aguas domésticas y residuales sin tratamiento previo en aguas superficiales incluye heces humanas y de animales (Corporación Autónoma Regional de Boyacá [Corpoboyacá], 2023) que contienen virus y bacterias patógenas relacionadas con altas tasas de morbilidad y mortalidad especialmente en la población infantil, generando una problemática ambiental y de salud pública (Ministerio de Salud y protección social, 2021). Las aguas destinadas para el desarrollo de actividades agrícolas en las condiciones mencionadas anteriormente pueden generar ETAs y EDA. El boletín epidemiológico para el año 2023 registró “53 muertes probables en menores de cinco años por EDA y se notificó un brote de ETAs en

población escolarizada, donde se identificaron 90 casos de 955 expuestos, para una tasa de ataque del 9,4 % en todo el país” (Instituto Nacional de Salud [INS], 2023).

En el caso específico del Distrito de riego del Alto Chicamocha, en el departamento de Boyacá, los afluentes que integran el río presentan alta carga orgánica y de microorganismos patógenos como *E. Coli* (Corpoboyacá, 2019). Con esta agua se efectúa el regadío de vegetales y productos agrícolas de la región, factor que podría estar relacionado con el aumento de ETAs y EDA en el departamento (Ardila & Gómez, 2017). En torno a la problemática expuesta, se hace necesario identificar y establecer métodos adecuados, eficientes para el tratamiento y eliminación de bacterias patógenas en el agua, que permitan proteger la salud pública. Es así como surge la pregunta de investigación:

¿En qué medida la fotocatalisis heterogénea basada en TiO_2 inactiva microorganismos como *E. Coli*, coliformes totales y otras enterobacterias para la prevención de casos de ETAs y de EDA en el departamento de Boyacá?

Justificación

Las Tecnologías Avanzadas de Oxidación (AOTs) permiten tratar contaminantes orgánicos e inorgánicos en aguas residuales mediante reacciones químicas de tipo redox que facilitan la eliminación de la carga microbiana del agua (Palit & Hussain, 2021). En esta investigación, se estudió la fotocátalisis heterogénea como alternativa a los métodos convencionales de desinfección en el tratamiento y eliminación de *E. coli*, coliformes totales y otras enterobacterias, en el afluente del Alto Chicamocha, en el departamento de Boyacá.

La fotocátalisis heterogénea ofrece las ventajas de trabajar a temperatura, presión ambiental y aprovechamiento de la luz solar o radiación ultravioleta para la activación del fotocatalizador (Friedmann, 2022). Esta tecnología es económica, respetuosa con el medio ambiente, requiere un equipo mínimo y es apropiada para sitios sin acceso a electricidad. Así mismo, favorece el reciclaje de aguas residuales para la irrigación de cultivos (Ibhadon & Fitzpatrick, 2013).

En el país se utilizan 16 mil millones de metros cúbicos de agua por año en el sector agrícola (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Parte de esta demanda podría cubrirse por medio del reúso de aguas residuales tratadas. La reutilización de aguas residuales aporta, entre otras cosas, beneficios como la disminución de escasez de agua en muchas áreas y contribuye con la gestión y regulación de los recursos hídricos; siempre y cuando se implementen adecuadamente. Las aguas residuales recuperadas deben asegurar la eliminación de microorganismos patógenos para la irrigación de cultivos alimentarios. Desde esta perspectiva, la fotocátalisis puede disminuir y prevenir los casos de ETAs en los consumidores de cultivos regados con aguas residuales (Ferro et al., 2015).

Por otro lado, este proyecto de investigación contribuye con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) específicamente con el ODS 6: de agua y saneamiento y el ODS 3: Salud y bienestar, ya que garantiza la prevención de ETAs y EDA. Finalmente, esta investigación permite fortalecer la alianza interinstitucional a través de la sinergia en torno a la protección y recuperación del recurso hídrico, según el proyecto financiado por Minciencias y Minsalud titulado “Saneamiento hídrico básico como foco de acción para la fotocatalisis heterogénea aplicada a la prevención de enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs) y de enfermedad diarreica aguda (EDA)” bajo el convenio interinstitucional 007 entre la UPTC y la UNAD, del cual hace parte esta investigación.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar la efectividad de la fotocatalisis heterogénea en la eliminación de bacterias entéricas presentes en el afluente del Alto Chicamocha.

Objetivos Específicos

Evaluar los fotocatalizadores $\text{TiO}_2(\text{F})$ modificados con Ag y Au al (0.125%) y (0.25%) respectivamente, en la eliminación de microorganismos entéricos.

Establecer una correlación entre las características fisicoquímicas de los fotocatalizadores y el desempeño de los materiales.

Caracterizar y analizar la eficiencia de los fotocatalizadores en las muestras de agua, teniendo en cuenta las proporciones para identificar el nivel de remoción de bacterias entéricas.

Marco Teórico

Tecnologías Avanzadas de Oxidación (con su sigla en inglés AOTs)

Las AOTs se definen como procesos que implican la formación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), altamente reactivos debido a su elevado potencial de oxidación ($E=2.8\text{V}$), lo que los hace altamente efectivos en la oxidación de compuestos orgánicos mediante la abstracción de hidrógeno (Hernández, 2017). Además, son esencialmente una intensificación del proceso mediante el uso de métodos híbridos para el tratamiento de aguas residuales, que generan grandes cantidades de radicales hidroxilo y sulfato. Las AOTs han demostrado ser altamente eficaces, con la aceleración del proceso de oxidación a través de la reacción de Fenton y las tecnologías de oxidación fotocatalítica (Khan et al., 2023). Entre estas tecnologías, las de mayor perspectiva son las de la fotooxidación, como por ejemplo la fotocatalisis heterogénea técnica que se usó en esta investigación. La fotocatalisis ha demostrado su eficacia en diferentes procesos de descontaminación ambiental en la degradación de contaminantes orgánicos en fase líquida (Wang et al., 2022) y en la mineralización de compuestos orgánicos volátiles en fase gaseosa (Coha, 2021).

Fotocatalisis heterogénea

La fotocatalisis es una de las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de contaminantes de agua, principalmente por su bajo costo y fácil aplicación. La fotocatalisis basada en TiO_2 ha demostrado ser altamente efectiva en la degradación de contaminantes orgánicos. La fotocatalisis heterogénea se fundamenta en la formación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), responsables de la eliminación de contaminantes orgánicos, microorganismos y reducir metales pesados en el mismo medio. El proceso se denomina heterogéneo porque consta de dos

fases en el medio de reacción: el sólido (fotocatalizador) y el líquido (reactivo o medio de reacción) (Murcia et al., 2018).

Malato et al., (2009) afirman que la fotocatalisis heterogénea utiliza la banda del ultravioleta (UV) cercano del espectro solar (200 nm - 400 nm), para foto-excitar un catalizador semiconductor que está en contacto con el agua y en presencia de oxígeno. Dentro de las ventajas de la fotocatalisis sobre los procesos químicos y biológicos en la descontaminación del agua, se destaca que puede trabajar a temperatura y presión ambiental, que se completa la oxidación de las sustancias hasta CO₂ y agua, el oxígeno requerido para la reacción se puede obtener directamente del aire y el catalizador a emplear es económico y reutilizable (Fox & Dulay, 1993). La fotocatalisis se ha consolidado en aplicaciones como por ejemplo reactores de pequeña capacidad, pinturas y cementos para descontaminar el aire y en la desinfección del agua (Doña & Pulido 2021).

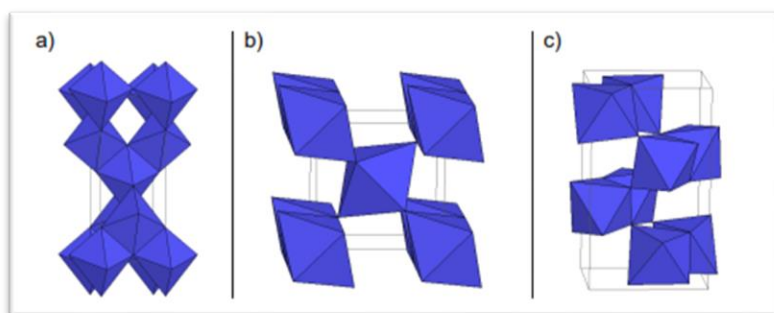
El fotocatalizador

El fotocatalizador es un material semiconductor que absorbe la luz con la longitud de onda apropiada para foto excitarse y generar especies reactivas para iniciar la reacción. El fotocatalizador ideal debe aportar estabilidad, reutilización y reciclabilidad. Por otro lado, Wei et al., (2019) discutieron la influencia de la morfología del fotocatalizador basado en TiO₂ para controlar la transferencia de electrones a nanopartículas de metales nobles (oro, plata o platino). El TiO₂ es el fotocatalizador más ampliamente utilizado y pertenece a la familia de los óxidos metálicos de transición, con formas de estructuras basadas en octaedros con diferentes fases estructurales. El TiO₂ presenta una estructura de tres fases cristalinas: la fase anatasa (tetragonal), la fase rutilo (tetragonal), y la fase brookita (ortorrómbico), siendo la fase anatasa la más estable (Villanueva, 2011). Además, en la fase anatasa, los octaedros están unidos por los

vértices (ver Figura 1a), mientras que en la fase rutilo, los octaedros se unen por las aristas (ver Figura 1b), y la fase brookita se caracteriza por la unión de ambos, vértices y aristas (ver Figura 1c) (Cortés, 2009). También, la fase anatasa tiene mayor superficie activa y mayor densidad de sitios activos para la adsorción de sustancias y gran actividad fotocatalítica, así pues, confirma su efectividad en el tratamiento de aguas residuales (Parra, 2001).

Figura 1

Estructuras cristalinas del TiO₂: a) Anatasa, b) Rutilo, c) Brookita.



Fuente. Tomada de (Cortés, 2009)

El TiO₂ es un semiconductor sensible a la luz que absorbe radiación electromagnética en la región UV (~350 nm), con un valor de energía de banda prohibida de 3.2 eV para la anatasa. El TiO₂ es anfotérico, muy estable químicamente y no es atacado por la mayoría de los agentes orgánicos e inorgánicos. La superficie del TiO₂ es polar y, por lo tanto, hidrofílica. En contacto con el agua, esta es quimisorbida y disociada, provocando la hidroxilación superficial del TiO₂ y generando grupos (\bullet OH) de diferentes grados de reactividad dependiendo de su localización (Perales, 2015).

Ahora bien, para que el TiO₂ tenga una alta eficiencia fotocatalítica bajo luz visible, existen una serie de estrategias que han sido desarrolladas para aumentar su eficiencia, incluyendo la incorporación de metales tanto en superficie como en la matriz de TiO₂, dopaje

con elementos no metálicos y metálicos, acoplamiento de TiO_2 con otros semiconductores, optimización de la morfología del TiO_2 y foto deposición de metales nobles en superficie (Nevárez et al., 2017). Estas dos últimas estrategias han sido usadas en esta investigación para mejorar el rendimiento fotocatalítico del TiO_2 . Con el fin de controlar el polimorfismo de la anatasa, en la síntesis de este material se ha utilizado flúor como agente de control morfológico (Dozzi et al., 2021), sin un paso adicional de calcinación, los iones de flúor sobre la superficie de la anatasa pueden promover la adsorción de oxígeno y actuar como sitios de captura de electrones facilitando el movimiento de las vacancias positivas hacia la superficie de TiO_2 (Chen et al., 2017). La mejora de la eficiencia fotocatalítica por adición de metales se produce principalmente por tres mecanismos: i) los metales nobles actúan como trampas de electrones, lo que favorece la separación de las cargas fotogeneradas; ii) la presencia de la resonancia de plasmón de la superficie de los metales nobles implica la excitación bajo luz visible, lo que conduce a la excitación de los electrones de la superficie y la transferencia de electrones en la interfaz y iii) algunos niveles de energía pueden ser producidos en la banda prohibida del TiO_2 por la dispersión de nanopartículas de metales nobles en la matriz de TiO_2 (Hernández et al., 2024).

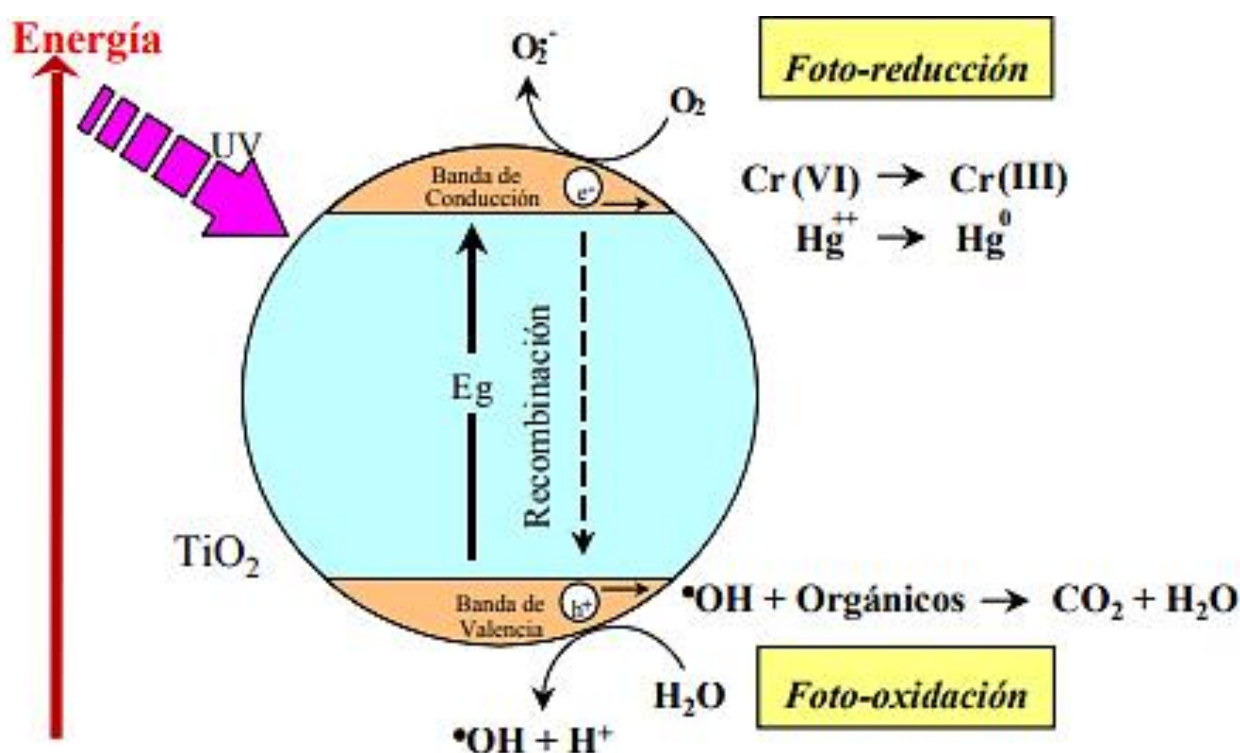
Por otra parte, el método hidrotermal asistido por microondas presenta ventajas como la obtención de un fotocatalizador con pequeños tamaños de partículas y elevada superficie específica con menores temperaturas y tiempos de síntesis más cortos comparados con el método hidrotermal clásico (Hernández et al., 2024).

El mecanismo fotocatalítico del TiO_2 comprende el proceso de absorción de un fotón con suficiente energía (igual o superior al ancho de banda del semiconductor). A partir de ahí, un electrón se desplaza desde la banda de valencia a la banda de conducción generando un hueco o

vacancia positiva (h^+) en la banda de valencia y un electrón libre en la banda de conducción (e^-), como se observa en la Figura 2 (Blanco, 2002). Estos pueden migrar a la superficie del TiO_2 , donde pueden participar en reacciones de oxidación y reducción con los contaminantes o recombinarse (Chiva et al., 2016).

Figura 2

Mecanismo fotocatalítico del TiO_2 .



Fuente. Tomada de Blanco (2002)

Es así como, los huecos (estados vacíos) que se forman en la banda de valencia del sólido reaccionan con especies donadoras de electrones, como moléculas de agua o iones hidroxilo unidos a la superficie del fotocatalizador, generando los radicales hidroxilo ($\bullet OH$) (Cabañas et al., 2019). Los electrones que llegan a la banda de conducción pueden reaccionar con una especie aceptora como el O_2 , lo que da lugar a radicales superóxido ($\bullet O_2^-$) los cuales participan en la oxidación de la materia orgánica (Aguirre, 2019). Sin embargo, los electrones y los huecos se

recombinan fácilmente; lo que limita las reacciones redox y produce energía en forma de calor o radiación no deseada (Medina, 2021).

La actividad fotocatalítica del TiO_2 es inhibida por la baja eficiencia cuántica debido a la recombinación de los pares electrón-hueco y a la energía de banda prohibida, cuya absorción se logra en la región del UV, la cual es una fracción muy pequeña de la luz solar (3- 5%) (Perales, 2015), estas son las limitantes del proceso fotocatalítico para su aplicación.

Parámetros que afectan el desempeño fotocatalítico

Diversos parámetros influyen en el proceso de oxido-reducción y afectan la eficiencia de la reacción. Algunos de ellos incluyen:

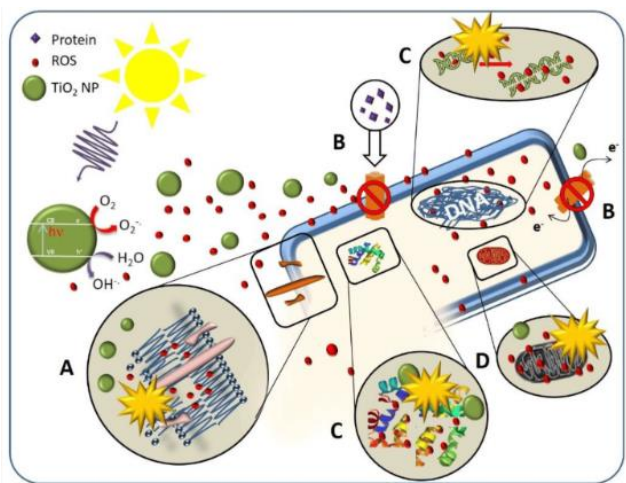
- **pH:** El proceso de fotocátalisis es más eficiente en medio ácido $3 < \text{pH} < 5$ debido a que la superficie del TiO_2 se encuentra cargada positivamente por debajo del punto isoeléctrico (6,5) y se favorece la interacción entre la superficie y el contaminante. El pH afecta las propiedades superficiales del catalizador, esto se refleja en la velocidad de degradación. El nivel adecuado para el tratamiento biológico del agua está en el intervalo de pH 6,5-8,5 (Melgoza de la Fuente, 2009).
- **Concentración del fotocatalizador:** La concentración del catalizador influye en la reducción del tiempo de degradación, esto indica un incremento en la velocidad de reacción con el aumento de concentración de catalizador, sin embargo, a estas condiciones, el paso de la luz a través de la suspensión está bloqueado por la alta concentración de partículas de catalizador (Contreras, 2009). Esta variable puede afectar la eficiencia del proceso durante la degradación de contaminantes.

Efecto bactericida de la fotocatalisis

En cuanto al efecto bactericida de la fotocatalisis, este proceso implica la generación de radicales hidroxilo que atacan a los componentes de la pared celular de los microorganismos, alterando su funcionalidad y conduciendo a la muerte celular (Cabañas et al., 2019). La pared celular de las bacterias se caracteriza por tener una membrana externa (ME) que contiene fosfolípidos y glicolípidos, principalmente lipopolisacáridos, una pared celular delgada de peptidoglicano; y una membrana citoplásmica interna (MI). La ME de las bacterias Gram-negativas es un objetivo atractivo para los radicales hidroxilo producidos por la foto activación de nanopartículas de TiO_2 . Estos radicales pueden dañar la ME y la MI, lo que lleva a la muerte celular (Rincón & Pulgarín, 2003). El rendimiento de la inactivación fotocatalítica asistida por TiO_2 está influenciado por el estado fisiológico y generacional de las bacterias. El estrés ambiental puede inducir la expresión de genes relacionados con la síntesis de proteínas y la resistencia a diversos tipos de estrés como el oxidativo. En micrografías TEM publicadas por De Pasquale et al., (2020), se observó que las nanopartículas de TiO_2 se acumulan en la ME de *E. coli*, causando daños irreparables y pérdida de viabilidad de la bacteria, es así como, estos autores proponen el mecanismo de acción bactericida del TiO_2 sobre el microorganismo como se observa en la Figura 3, iniciando con (A) un daño celular y peroxidación lipídica debido a la unión por interacción electrostática de la pared celular con el TiO_2 , (B) interrupción del flujo citoplasmático e ingreso de nutrientes, debido a la obstrucción generada por el TiO_2 (C) degradación fotocatalítica de macromoleculares biológicas y (D) degradación fotocatalítica de orgánulos intracelulares.

Figura 3

Mecanismo de acción de TiO₂ sobre los microorganismos patógenos.



Fuente. Tomada de De Pasquale et al., (2020).

Efecto bactericida de la luz

El efecto bactericida de la luz es un proceso que permite la inactivación de microorganismos con luz ultravioleta, generando daños directos o indirectos sobre diferentes componentes celulares. La irradiación UV destruye bacterias y otros microbios. Enwemeka et al., (2009) creen que la luz azul (400-500 nm) responsable de matar varios patógenos, ejerce sobre el ADN efectos similares a los de la luz ultravioleta, siendo absorbida en el doble enlace dentro de las bases pirimidínicas del ADN, como la timidina y la citosina. Los efectos bactericidas de la luz visible podrían atribuirse a altas cantidades de ROS generadas por fotosensibilizadores endógenos en las bacterias. Por lo tanto, altas cantidades de ROS son letales para la célula (Lubart et al., 2011).

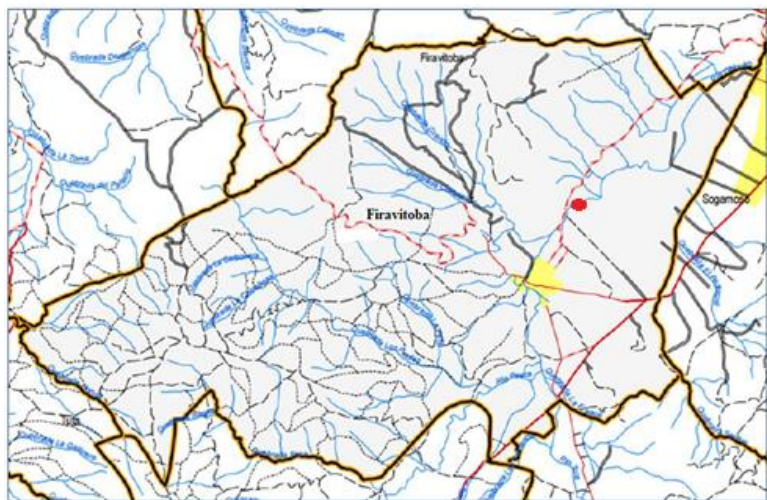
Contaminación en afluentes del Alto Chicamocha

Los afluentes del Alto Chicamocha, ubicados en el municipio de Firavitoba, (Boyacá) se ven afectados de manera diversa, por fuentes de contaminación atribuidas principalmente a aguas

domésticas, provenientes de Firavitoba y municipios aledaños. Además, se destacan las actividades de ganadería, horticultura, pecuaria y agricultura, que contribuyen con la contaminación del agua mediante el uso de pastos y frutales, fertilizantes y pesticidas, así como también residuos (orgánicos e inorgánicos) de fincas agrícolas. Otros factores de contaminación incluyen vertidos industriales y residuos sólidos (Abril et al., 2007). Esta variedad de fuentes de contaminación altera la calidad del agua y del ecosistema, lo que justifica la aplicación de este estudio. En la Figura 4, se observa el mapa hidrográfico de Firavitoba, donde se ubica el afluente del Alto Chicamocha donde se tomaron las muestras en Boyacá.

Figura 4

Mapa hidrográfico de Firavitoba, ubicación del afluente del Alto Chicamocha donde se tomaron las muestras.



Fuente. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (2011). Tomada de (Empresa Social del Estado Centro de Salud de Firavitoba, 2019).

En el distrito de riego del Alto Chicamocha y Firavitoba el 78,2% de los usuarios dedican las tierras a la actividad agrícola, el 21% combina la actividad agrícola con la pecuaria y solo el 0,8% se dedica exclusivamente a la actividad pecuaria. El modelo de sistema de producción

predominante es el de monocultivo, destacándose el cultivo de cebolla de bulbo, que se rota con otras hortalizas como repollo, brócoli, arveja y espinaca (Bermúdez et al., 2010). El agua del Alto Chicamocha se utiliza para diversos fines en la región, pero la contaminación del líquido puede representar un riesgo para la salud pública si no se trata adecuadamente, lo que puede provocar ETAs y EDA, por el consumo de vegetales irrigados con agua contaminada con bacterias como *E. coli*.

Marco conceptual

Microorganismos patógenos

Un patógeno se define como un organismo que causa enfermedad a su huésped, y la gravedad de los síntomas de la enfermedad se denomina virulencia. Los patógenos son taxonómicamente muy diversos y comprenden virus y bacterias (Balloux & van Dorp, 2017). Según Campos et al., (2003) los alimentos en ocasiones pueden actuar como vehículo de microorganismos patógenos o sus toxinas, con alto riesgo para la salud del consumidor, causando brotes de origen alimentario, lo que puede representar un grave problema de salud pública. Las bacterias patógenas presentes en alimentos pueden llegar a contaminarlos y terminar derivando una ETA. Los patógenos en alimentos más habituales son: *Campylobacter*, *Salmonella*, *Listeria*, *E. coli*, *S. aureus* (Baño, 2008).

Enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs)

Definidas como el síndrome originado por la ingestión de alimentos y/o agua, que contengan microorganismos patógenos perjudiciales para la salud del consumidor (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, s.f.). Las ETAs pueden afectar de manera individual como colectiva y son consideradas una carga significativa de enfermedad a nivel mundial (Olea et al., 2012). Las ETAs constituyen un importante problema de salud pública debido al aumento en su ocurrencia, la creciente resistencia de los patógenos a los antimicrobianos y el impacto socioeconómico que generan (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, s.f.). Estas enfermedades se caracterizan por una variedad de síntomas gastrointestinales como: náuseas, vómito, diarrea, dolor abdominal y fiebre (Soto et al., 2016). En algunos casos, pueden presentarse complicaciones graves como sepsis, meningitis, abortos, síndrome de Reiter, síndrome de Guillan Barré o incluso la muerte (Fernández et al., 2021). Cuando el tratamiento

del agua es inadecuado e ineficiente, se incrementa el riesgo de padecer ETAs. La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que los alimentos se ven involucrados en casos de ETAs debido a la contaminación ambiental y en este caso específico por el contacto con el agua. La bacteria *E. coli* productora de toxina Shiga puede ser aislada en masas de agua (estanques y arroyos), pozos, y puede sobrevivir durante meses en el estiércol y en los sedimentos de recipientes de agua (Bergaglio & Bergaglio, 2020).

Tipos de ETAs

Las ETAs pueden ser de dos tipos: Infecciones e intoxicaciones alimentarias (Organización Panamericana de la Salud [OPS] (s.f.). Una infección alimentaria ocurre cuando se ingieren alimentos que contienen microorganismos patógenos vivos (INS, 2019). Son determinadas por la invasión, multiplicación y alteraciones de los tejidos del huésped producidas por gérmenes transportados por los alimentos. Las infecciones alimentarias presentan dos variantes:

a) Infecciones invasivas: Se caracterizan por la colonización de tejidos y órganos provocadas por el agente causal. Este grupo comprende virus, protozoos, parásitos y bacterias como *Salmonella*, *Aeromonas*, *Campylobacter*, *Shigella*, *Vibrio parahaemolyticus*, *Yersinia* y *Escherichia coli* (Torrens et al., 2015).

b) Toxiinfecciones: Ocasionadas por bacterias no invasivas, pero capaces de colonizar y multiplicarse en el tracto intestinal del hospedero, donde excretan sus toxinas (Fernández et al., 2021).

Se estima que el 70% de las diarreas se originan por la ingestión de alimentos contaminados con microbios y sus toxinas, en cantidades suficientes para afectar la salud del consumidor.

Las intoxicaciones alimentarias como las producidas por *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, se producen cuando las toxinas de las bacterias o mohos ya están presentes en el alimento ingerido (Bolaños et al., 2007). Las salmonelosis es una de las mayores causas de intoxicación alimentaria en el mundo, una fuente común de esta enfermedad es el agua contaminada (Parra et al., 2002).

Por otra parte, los coliformes se introducen en gran número al medio ambiente, por las heces de los humanos y los animales, por tal motivo la mayoría de los coliformes que se encuentran en el ambiente son de origen fecal. También, son indicadores de contaminación del agua y los alimentos, la presencia de coliformes en la elaboración, preparación y expendio de alimentos es un indicio de que los mismos pueden estar contaminados con aguas residuales u otro tipo de desechos en descomposición (Páez, 2009).

Algunos factores que contribuyen en la producción de ETAs son los siguientes (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, s.f.):

- Características físicas en el alimento (temperatura, humedad, tiempo) que favorecen el crecimiento del microorganismo o la producción de toxinas.
- Agente etiológico presente en cantidad suficiente, para causar la infección o la intoxicación.
- Ingerir una cantidad (porción) suficiente del alimento que contenga el microorganismo o agente etiológico, que sobrepase la barrera de protección de la persona.

Enfermedad Diarreica Aguda (EDA)

La EDA se caracteriza por un aumento en la frecuencia y una disminución en la consistencia de las heces. Puede ir acompañada de otros síntomas como dolor abdominal, fiebre, náuseas y malestar (Flórez et al., 2015). Virus, bacterias y protozoos son responsables de la

mayoría de las infecciones, que se transmiten comúnmente por la ruta fecal y oral a través del agua, la alimentación y la transmisión persona a persona (Kelly, 2015). Además, la infección es más común cuando hay escasez de agua limpia para beber, cocinar o lavar (Simbaña, 2019). La destrucción o desactivación de los microorganismos patógenos puede lograrse mediante la aplicación de métodos de desinfección o esterilización.

Desinfección

La desinfección es un procedimiento que utiliza técnicas físicas o químicas para eliminar, inactivar o inhibir a un gran número de microorganismos encontrados en el ambiente (Rodríguez, 2006). Los métodos de desinfección comunes incluyen el uso de productos químicos como cloro, yodo, alcohol, peróxido de hidrógeno, entre otros. También se utilizan técnicas físicas como la radiación ultravioleta y el calor para desinfectar. Además, implica la destrucción de microorganismos, pero generalmente no de las esporas, en superficies u objetos inanimados. Los agentes antimicrobianos designados como desinfectantes son utilizados alternadamente como agentes esterilizadores, agentes de saneamiento o antisépticos (Kahrs, 1995).

Esterilización

La esterilización consiste en la destrucción o eliminación de cualquier tipo de vida microbiana, incluyendo las formas esporuladas de hongos y bacterias. El agente esterilizante ideal es aquel que consigue una acción bactericida, esporicida, tuberculicida, fungicida y viricida; actúa en el menor tiempo posible y posee alto poder de penetración (Silvestre et al., 2009).

Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de agua residual consiste en una serie de procedimientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios que se basan en procesos biológicos, físicos y químicos con el

objetivo de mejorar las condiciones de salubridad y eliminar contaminantes que dañan los ecosistemas y desencadenan la eutrofización (Praveenkumar et al., 2024). El tratamiento es crucial para asegurar la sostenibilidad del medio ambiente y gestionar los recursos hídricos, lo que contribuye a eliminar contaminantes y sustancias peligrosas, haciéndola segura para su uso en diferentes aplicaciones (Acevedo, 2011). Los usos finales más comunes del agua tratada incluyen agua para actividades de recreación, agricultura, suministro industrial y reposición de fuentes ambientales.

Reciclado de aguas residuales

El reciclado de agua tratada es una práctica que proporciona un recurso hídrico renovable y sostenible que permite fortalecer los suministros locales de agua, ahorrar energía y reducir la cantidad de efluentes que se vierten en el medio ambiente, así como la consecución de beneficios ambientales y económicos (Mixán & Núñez, 2020).

Metodología

Metodología- Método.

La presente investigación es de tipo cuantitativa, orientada al desarrollo de materiales fotocatalíticos con aplicación en el tratamiento de agua para la eliminación de bacterias. Los experimentos se realizaron por duplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados. El trabajo experimental se centró en determinar cuál de los fotocatalizadores es más efectivo en la eliminación de *E. coli*, coliformes totales y otras enterobacterias. La población de bacterias en las muestras se reporta como (Unidades Formadoras de Colonias) UFC /100 mL. La hipótesis estadística se estudió con el análisis de varianza ANOVA.

Todo lo anterior dirigido al cumplimiento de los objetivos planteados y a corroborar las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H₀): Todos los materiales fotocatalíticos presentan el mismo porcentaje de eliminación de *E. Coli*, coliformes totales y otras enterobacterias.
- Hipótesis alternativa (H_a): Al menos uno de los fotocatalizadores presenta el mayor porcentaje de eliminación de *E. Coli*, coliformes totales y otras enterobacterias.

En este caso, la unidad experimental de estudio corresponde al agua del afluyente del Alto Chicamocha, la variable de respuesta es el porcentaje de eliminación de bacterias. El factor es el tratamiento fotocatalítico, el diseño experimental de la investigación fue un diseño completamente al azar con dos réplicas, el cual permitió obtener información relevante en relación con el efecto del factor sobre el porcentaje de eliminación de bacterias. El modelo estadístico planteado se observa en la siguiente ecuación:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

y_{ij} = variable respuesta, en este caso porcentaje de eliminación de *E. Coli*, coliformes totales y otras enterobacterias.

μ = es la media global

τ_i = es el efecto del material fotocatalítico

ε_{ij} = representa el error aleatorio

El desarrollo de la investigación consistió en cuatro etapas: en la primera etapa se realizó la síntesis de fotocatalizadores, en la segunda etapa su caracterización de los fotocatalizadores, en la tercera etapa la toma de muestras y en la cuarta etapa la evaluación de la actividad de los materiales fotocatalíticos.

1. Primera etapa: Síntesis de los Fotocatalizadores

El fotocatalizador TiO_2 se preparó mediante el método hidrotérmal (HT) asistido por microondas, siguiendo la metodología de Puga et al., (2020). Se empleó tetraisopropóxido de titanio (Aldrich, 97%), con adición gota a gota de HF (AnalaR NORMAPUR®, 40 %) en una relación 24:4 V/V de TiO_2/HF . Posteriormente, se aplicó un sistema de digestión por microondas de alto rendimiento (Milestone, Ethos ONE), el programa de calentamiento se realizó a 140°C durante 2 h. Finalmente, el sistema se enfrió a temperatura ambiente. El precipitado obtenido se centrifugó y se lavó cinco veces con agua desionizada y se secó a 100°C durante 10 h, el material obtenido se denominó $\text{TiO}_2(\text{F})$.

Modificación del fotocatalizador $\text{TiO}_2(\text{F})$ por reducción fotoquímica de metales nobles

En un matraz de 250 mL se agregaron 6.25 mL de isopropanol, la cantidad requerida de agua destilada y el precursor metálico para obtener el 0.25% y 0.125% en peso de metal (Ag o

Au), sobre partículas de $\text{TiO}_2(\text{F})$. Los precursores metálicos fueron nitrato de plata ($\text{AgNO}_3 \geq 99\%$) y cloruro de oro (III) trihidratado (HAuCl_4 , Aldrich 99,9%), respectivamente. La suspensión obtenida se sometió 10 min a ultrasonido. Luego, la suspensión se transfirió a un cristizador y se agitó durante 10 min bajo atmósfera de nitrógeno en oscuridad. Posteriormente, se irradió durante 2 h con lámparas UV a $90\text{W}/\text{m}^2$ de intensidad de luz bajo agitación constante. Finalmente, la suspensión se filtró y la fase sólida se secó a 90°C durante 8 h.

En la investigación se trabajó con 5 fotocatalizadores sintetizados, los cuales fueron:

- $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Au}$ (0.25%)
- $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Au}$ (0.125%)
- $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.25%)
- $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.125%)
- $\text{TiO}_2(\text{F})$

2. Segunda etapa: Caracterización Físicoquímica de los Fotocatalizadores

Las técnicas de caracterización y los equipos que se utilizaron fueron con los que dispone el grupo de Catálisis de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de los Materiales (INCITEMA) y el Instituto de Ciencia de los materiales de Sevilla en España. Las técnicas de caracterización se realizaron con la finalidad de determinar las características estructurales, morfológicas y superficiales de los materiales, las cuales se describen a continuación:

Difracción de rayos-X (DRX)

Esta técnica permitió determinar la composición de las fases cristalinas y el grado de cristalinidad de los materiales. Se usó un difractómetro PW1700 de Philips y se realizó un barrido en la posición del ángulo 2θ entre 20° y 80° .

Espectrofotometría Ultravioleta-Visible de Reflectancia Difusa (UV-Vis DRS)

Mediante esta técnica, fue posible obtener información sobre los espectros de absorción de luz de las muestras y determinar el valor de la energía de la banda prohibida (band gap) de los materiales. Se utilizó un espectrómetro Varian modelo Cary 100, equipado con una esfera de integración y usando BaSO₄ como referencia. Los valores de band gap de los fotocatalizadores se calcularon con la función de Kubelka-Munk $F(R_{\infty})$ según la ecuación 2:

$$F(R_{\infty}) = \frac{(1-R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} \propto \frac{k}{\sigma} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde se relaciona la reflectancia difusa del material (R) con los coeficientes de adsorción (k) y de dispersión (σ).

Fisisorción de Nitrógeno

Esta técnica permitió determinar el área superficial S_{BET} . Se usó un equipo Micromeritics ASAP 2010. Las medidas se realizaron a través de isothermas de adsorción/desorción de nitrógeno a 77 K.

Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Los diferentes grupos funcionales que pueden tener los fotocatalizadores fueron identificados por FTIR. El FTIR se realizó utilizando la celda de ATR, en un espectrómetro Thermo Scientific iS50 FT-IR. Se utilizaron intervalos en la región del espectro IR comprendidos entre 4000 y 400cm⁻¹ con una resolución de 2cm⁻¹.

3. Tercera etapa: Toma de muestras de agua

Las muestras se tomaron del afluente del Alto Chicamocha en Boyacá, en el punto ubicado en las coordenadas (latitud: 5.691786, longitud: -72.978952). Los muestreos se realizaron teniendo como base los métodos estándar para el examen de aguas y aguas residuales (Rice et al., 2012). La muestra compuesta se homogenizó por agitación y después se realizó el

llenado de los recipientes. Para el análisis de *E. coli*, coliformes totales y otras enterobacterias las muestras se tomaron ubicando directamente la botella bajo el flujo del afluente, hasta completar el volumen necesario sin dejarla rebosar. Para transportar las muestras hasta el laboratorio, las botellas se colocaron dentro de la nevera con hielo suficiente para asegurar la refrigeración y conservarlas.

4. Cuarta etapa: Evaluación de la actividad de los fotocatalizadores

Los ensayos de evaluación de la actividad fotocatalítica a nivel de laboratorio se llevaron a cabo en un reactor tipo batch de 400 mL, la reacción se realizó con 250 mL de agua, 1g/L de fotocatalizador, flujo continuo de aire de 35 L/h y agitación constante. Se dejó en oscuridad 20 min para favorecer el equilibrio adsorción/desorción, luego se inició la irradiación usando una lámpara Osram Ultra-Vitalux con intensidad de luz de 30 W/m², para medir la intensidad de la luz incidente (I) se usó un fotómetro UVA, PMA 2200 Delta OHM HD 2102.2. El tiempo total de reacción fue de 4 horas, pasado este tiempo se filtró la muestra para retirar el fotocatalizador y el agua tratada se destinó para análisis microbiológico y fisicoquímico.

Reacción blanco

Sabiendo que la luz UV tiene un efecto bactericida; se desarrolló un experimento de reacción blanco. Se trabajaron las mismas condiciones de la evaluación de la actividad, en ausencia de fotocatalizador.

Análisis fisicoquímico de las muestras

Las muestras del afluente del Alto Chicamocha y el agua tratada fueron analizadas mediante parámetros fisicoquímicos de pH, cloruros, y nitratos, con el uso de un colorímetro portátil Spectroquant® Move 100. Cada prueba se analizó dos veces con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Análisis microbiológico de las muestras

El análisis microbiológico se realizó mediante el método de filtración por membrana SM 9222B o método ISO 9308 parte 1 (International Organization for Standardization [ISO], 2014).

Preparación del medio de cultivo. Se disolvió 26.5g de agar Chromocult en un litro de agua destilada estéril; luego se mezcló y colocó en plancha de calentamiento hasta disolver completamente, se esterilizó a 121°C por 15 minutos 15 psi. Se dejó enfriar a 45 – 50°C, se sirvió en las cajas de Petri, y se enfrió hasta solidificar.

Fase analítica. Se desinfectó completamente el área de trabajo, se esterilizó el material de vidrio para las diluciones, por esterilización en húmedo en autoclave y el material para siembra de filtración por membrana, se esterilizó en seco. Para realizar las diluciones de la muestra se dispuso de frascos Schott. Cada dilución se preparó adicionando 10 mL de la muestra a 90 mL de solución salina al 1%, para completar 100 mL de dilución. Para sembrar cada dilución, se filtró a través de la membrana de nitrato de celulosa. Luego se incubaron las cajas de Petri en posición invertida y se dejaron por 24 horas a 37°C. Posteriormente, se leyó el número de colonias resultantes en cada caja y se procesaron los resultados para informarlos como UFC/100 mL.

Resultados

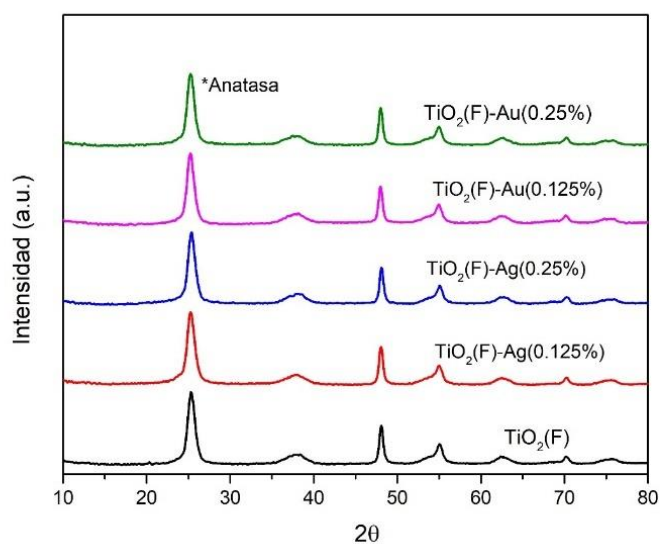
Caracterización fisicoquímica de los fotocatalizadores

Difracción de rayos-X (DRX)

La difracción de rayos-X permite identificar la fase cristalina de un compuesto, ya que el espectro de DRX es único para cada material (Perales, 2015). La Figura 5 presenta los patrones de difracción del fotocatalizador $\text{TiO}_2(\text{F})$ y los materiales modificados con Ag y Au.

Figura 5

Patrones de difracción de rayos-X de los fotocatalizadores



Fuente: La autora

En todas las muestras analizadas, se identificó a la anatasa como la única fase cristalina presente, reconocida por sus señales características de localización en la posición 2θ de $25,32^\circ$ con el pico de mayor intensidad y los demás picos ubicados en $25,35^\circ$; $25,15^\circ$; $25,35^\circ$; $25,20^\circ$ y $25,35^\circ$ para cada uno de los fotocatalizadores, de acuerdo con la ficha JCPDS No. 021-1272.

Cabe destacar que el ensanchamiento del pico a $38,1^\circ$ que corresponde al plano cristalino (004), nos indica que los materiales presentan la cara {001} expuesta.

El tamaño del cristalito de la fase anatasa se calculó utilizando la ecuación de Scherrer (ecuación 3) y se informó en la Tabla 1.

$$D = \frac{k\lambda}{B \cos \theta} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Para todas las muestras, el tamaño del cristalito de la fase anatasa mostró una variación mínima; lo cual está asociado con las condiciones operativas de la síntesis. Así, la velocidad de crecimiento del cristal está exponencialmente relacionada con su energía superficial. Se identificó que los cristales de TiO_2 obtenidos presentan caras expuestas {001}, que se espera sean más prometedoras en términos de morfología y fotoactividad debido a su mayor reactividad, en comparación con la cara {101} según lo reportado en trabajos previos (Puga et al., 2020).

Los resultados de DRX permitieron confirmar que el método de síntesis usado fue adecuado para obtener TiO_2 facetado, esto debido a que el flúor actúa como agente de control morfológico con capacidad para estabilizar el crecimiento preferencial de la cara reactiva {001} de anatasa (Lara et al., 2018).

Tabla 1

Resultados de caracterización de los fotocatalizadores

Fotocátalisis	Tamaño de cristalito (nm)	S_{BET} (m²/g)	Band gap (eV)
TiO ₂ (F)-Au (0.25%)	8.00	158.53	3.26
TiO ₂ (F)-Au (0.125%)	8.02	157.98	3.25
TiO ₂ (F)-Ag (0.25%)	8.06	158.08	3.28
TiO ₂ (F)-Ag (0.125%)	8.13	154.88	3.27
TiO ₂ (F)	7.81	150.21	3.30

Nota: Esta tabla presenta los resultados de la caracterización para cada uno de los

fotocatalizadores. *Fuente:* La autora

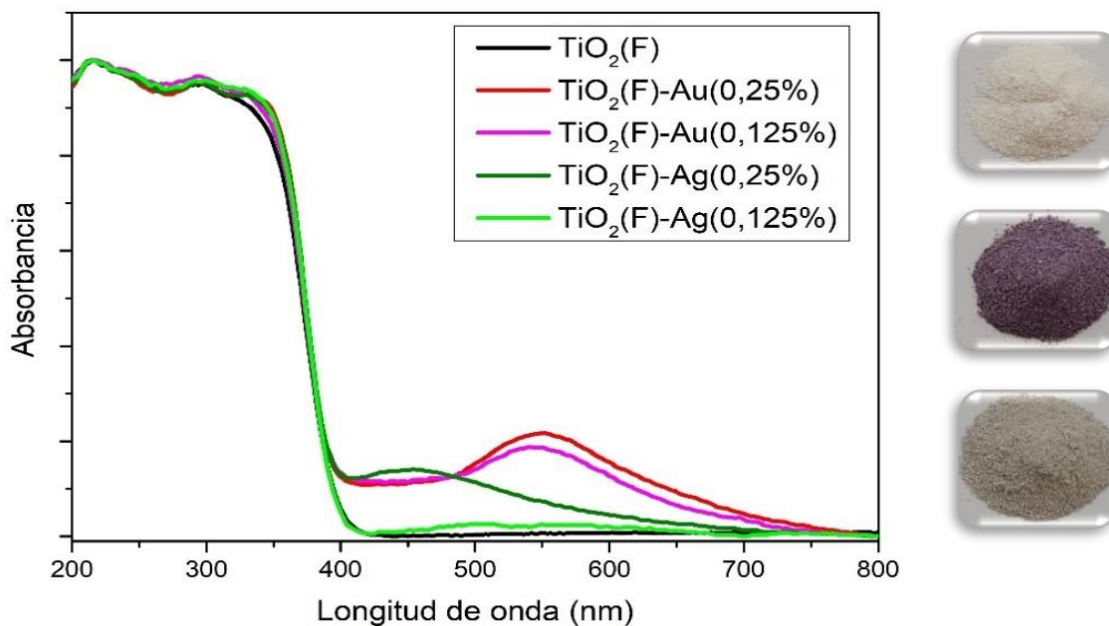
Espectrofotometría Ultravioleta Visible de Reflectancia Difusa (UV-Vis DRS)

Los valores de ancho de banda (band gap) se reportan en la Tabla 1, donde el menor valor de band gap fue para el fotocatalizador $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Au}$ (0.125%). La disminución del band gap indica que los materiales se fotoexcitan con menor energía, por lo cual se espera que este material sea el más fotoactivo. El material que presenta mayor band gap es $\text{TiO}_2(\text{F})$ con un valor de 3.30 eV, sin embargo, los valores de band gap de los materiales modificados con plata mostraron una disminución muy baja en comparación con $\text{TiO}_2(\text{F})$, este fenómeno puede deberse a que los metales nobles pueden actuar como trampas de electrones, lo que reduce la energía necesaria para excitar un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción (Murcia et al., 2017).

En la Figura 6, se observan los espectros UV-Vis DRS de los fotocatalizadores $\text{TiO}_2(\text{F})$ y los modificados con Ag y Au en el rango entre 200 y 800 nm. Se puede observar la absorción característica del TiO_2 en una longitud de onda de 350nm hasta 800 nm en el espectro UV-Vis para el material $\text{TiO}_2(\text{F})$. En el caso de los materiales modificados con nanopartículas de plata se evidencia el plasmón superficial característico del metal entre 400-550 nm el cual presenta una mayor intensidad con el mayor porcentaje de plata depositado en la superficie del material que es $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.25%).

Figura 6

Espectros Uv-Vis DRS de los fotocatalizadores



Fuente: La autora

Por otra parte, también se observa en la Figura 6 que los materiales foto depositados con Au, en la región visible del espectro presentan la banda de absorción característica del plasmón superficial del oro metálico ubicada a 540 nm, aquí se observa la diferencia en la intensidad de los plasmones entre las muestras analizadas, presentando mayor absorbancia el material con el mayor contenido de oro $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Au}$ (0.25%). Se ha reportado que la amplitud e intensidad del plasmón de Au está directamente relacionada con el tamaño de las partículas de Au (Vaiano et al., 2016).

La mayor absorción para los fotocatalizadores modificados con los metales nobles en el rango visible puede ser consecuencia de una disminución en la reflectividad debido al color violeta para el oro y gris claro para la plata, que modifican la coloración final de los polvos. En la parte superior derecha de la Figura 6 se muestran las fotografías de los fotocatalizadores

analizados, en las cuales se observan claramente los cambios de color. De arriba hacia abajo en las fotografías se presenta el $\text{TiO}_2\text{(F)}$ (de color blanco), debajo el $\text{TiO}_2\text{(F)-Au}$ (0.25%) y finalmente el $\text{TiO}_2\text{(F)-Ag}$ (0.25%), también fue posible identificar que la intensidad del color aumenta con el contenido de Au o Ag.

Fisisorción de Nitrógeno

Los valores de superficie específica (S_{BET}) para los fotocatalizadores analizados están incluidos en la Tabla 1. Como se puede observar en esta tabla, el $\text{TiO}_2\text{(F)}$ presenta un valor mucho más alto que el material obtenido por el método sol-gel (es decir $11 \text{ m}^2/\text{g}$) por Murcia et al., (2018), esto es debido a la exposición de la cara $\{001\}$ de anatasa. Lo cual indica que el método de síntesis y las modificaciones estructurales del material favorecen una mayor área superficial disponible para una mejor fotoactividad.

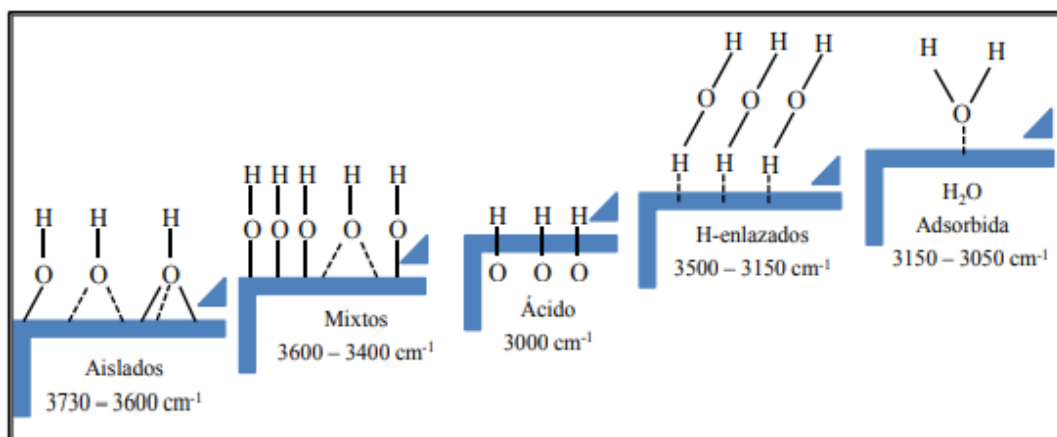
Los materiales modificados con metales en general presentaron un aumento de área superficial debido a las nanopartículas que fueron depositadas en la superficie del $\text{TiO}_2\text{(F)}$, siendo el mayor valor para el material $\text{TiO}_2\text{(F)-Au}$ (0.25%).

Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Mediante FTIR se obtuvo información de los grupos funcionales en la superficie de los materiales fotocatalíticos, diversas investigaciones (Araña et al., 2004) (Torres et al., 2015) se han enfocado en la caracterización de grupos hidroxilo en la superficie de óxidos metálicos, y especialmente en el TiO_2 . El rango de frecuencia infrarroja donde aparecen los tipos de grupos ($\bullet\text{OH}$) superficiales se presentan en la Figura 7 (Murcia, 2013).

Figura 7

Distribución de los grupos hidroxilo superficiales presentes en el TiO_2 .

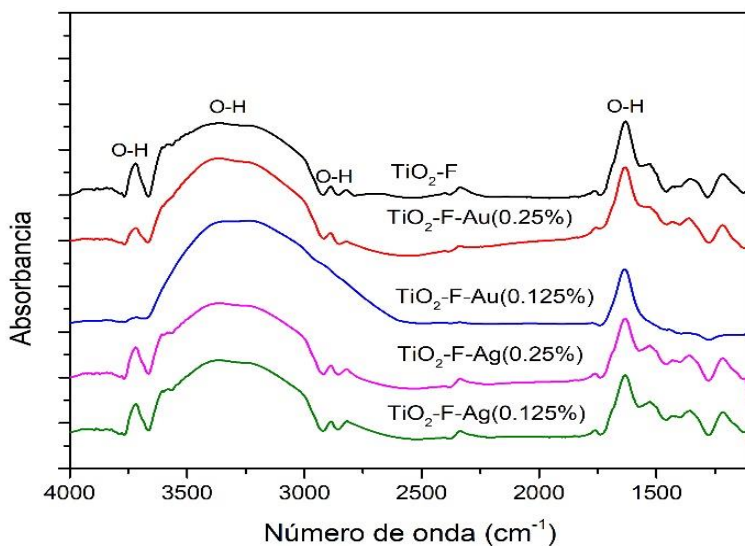


Fuente. Tomado de (Murcia, 2013).

Los espectros por FTIR obtenidos al analizar los materiales se observan en la Figura 8, donde se confirma la presencia de grupos hidroxilo superficiales en las muestras analizadas, en la región comprendida entre 4000 y 2400 cm^{-1} , se pudo evaluar la distribución y el tipo de grupos hidroxilo superficiales presentes en los fotocatalizadores. Se identifican grupos hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) aislados en las bandas $3720,4\text{ cm}^{-1}$; en $3318,8\text{ cm}^{-1}$ se encuentran los grupos hidroxilo mixtos y enlazados, la banda incrementa la intensidad de absorbancia en los materiales con partículas metálicas en superficie comparados con el material $\text{TiO}_2(\text{F})$. La banda observada en 1639 cm^{-1} se asigna a los modos vibracionales de flexión del agua (ν_2) y la banda localizada en $28795,1\text{ cm}^{-1}$ se atribuye a los modos de vibración de estiramiento asimétrico (ν_3) y estiramiento simétrico (ν_1) (Murcia et al., 2018).

Figura 8

Espectros FTIR de los fotocatalizadores sintetizados.



Fuente: La autora

Evaluación de la actividad de los materiales fotocatalíticos

Se realizó el análisis de varianza ANOVA para los datos del diseño completamente al azar con dos réplicas, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2

Análisis de varianza ANOVA.

Análisis De Varianza

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	14075783.65	6	2345963.941	7.842	2.149 E-05	2.371
Dentro de los grupos	10469518.08	35	299129.087			
Total	24545301.72	41				

Nota: Esta tabla muestra los resultados del análisis estadístico para corroborar la hipótesis

planteada. *Fuente:* La autora

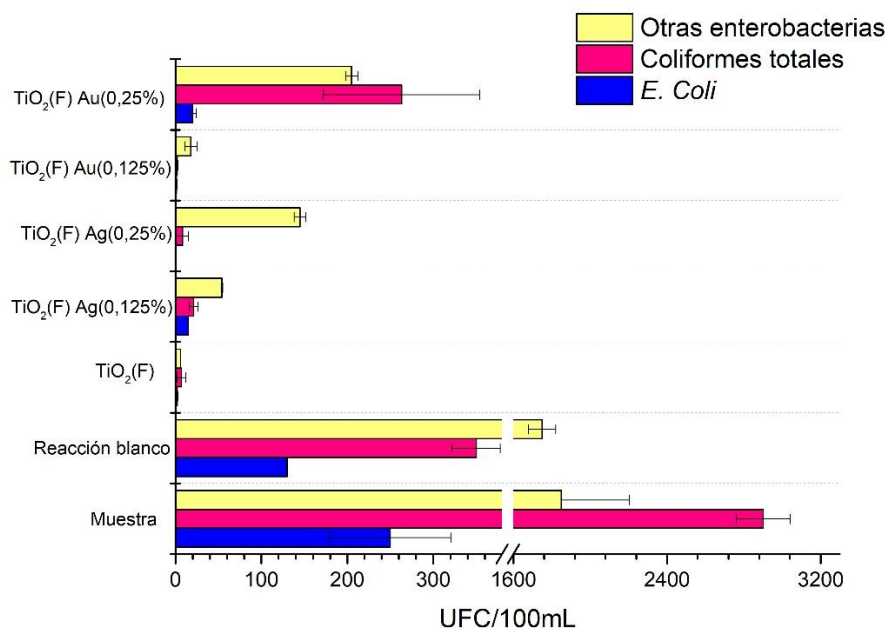
De acuerdo con el valor de $p > 0.5$ se rechaza la hipótesis nula: Todos los materiales fotocatalíticos presentan el mismo porcentaje de eliminación de *E. Coli*, coliformes totales y otras enterobacterias. Por lo cual, con los resultados experimentales se procede a confirmar cuál de los tratamientos fotocatalíticos presenta el mayor porcentaje de eliminación de bacterias entéricas.

Reacción blanco

Los resultados de la Figura 9, permiten evidenciar el efecto bactericida que tiene la luz UV-Vis, en la inactivación de *E. coli* la cual fue de 48%, mientras que para coliformes totales fue del 88%, y para otras enterobacterias se obtuvo el 5% de eliminación. El efecto antibacteriano de la luz se atribuye a la absorción de radiación UV-B y UV-A por parte de los cromóforos intracelulares (Malato et al., 2009), lo que contribuye a la generación de ROS, las cuales interactúan con el ADN generando ruptura y modificaciones de la cadena de ácidos nucleicos, que pueden ser mutagénicas y letales para la célula (McGuigan et al., 2012). Además, se generan reacciones de oxidación de proteínas y daños en la membrana celular produciendo la muerte o la inactivación de las bacterias (Hernández, 2017).

Figura 9

Población de bacterias antes y después de los diferentes tratamientos fotocatalíticos



Fuente: La autora

Actividad Fotocatalítica en el tratamiento de agua del afluente del Alto Chicamocha

Parámetros Físicoquímicos de calidad en el Agua

Los parámetros físicoquímicos de calidad a los cuales se les realizó seguimiento antes y después del tratamiento fotocatalítico se presentan en la Tabla 3, donde se puede evidenciar que los fotocatalizadores modificados con Ag y Au presentan la mayor reducción de cloruros y nitratos en la fase líquida, lo que puede ser debido a la función de adsorción sobre la superficie del fotocatalizador de iones cloruro (Mais et al., 2021). El valor del pH presenta una disminución después de todos los tratamientos fotocatalíticos, lo que puede atribuirse a que los compuestos orgánicos presentes en el agua, pueden ser descompuestos en ácidos más simples y estos ácidos pueden contribuir a la disminución del pH del agua tratada (Carriazo et al., 2012).

Tabla 3

Parámetros fisicoquímicos de calidad del agua antes y después de los tratamientos fotocatalíticos

Tratamientos	Cloruros (ppm)	Nitratos (ppm)	pH
TiO ₂ (F)-Au (0.25%)	<2.5	<0.2	4.22
TiO ₂ (F)-Au (0.125%)	<2.5	<0.2	4.32
TiO ₂ (F)-Ag (0.25%)	<2.5	<0.2	3.98
TiO ₂ (F)-Ag (0.125%)	8	<0.2	3.81
TiO ₂ (F)	9.5	<0.2	4.12
Muestra	12.5	0.4	6.57

Nota: La tabla presenta los resultados de parámetros fisicoquímicos para realizar un seguimiento antes y después del tratamiento fotocatalítico. *Fuente:* La autora

Eliminación de bacterias

En la Figura 9, se representa la actividad fotocatalítica de todos los fotocatalizadores en cuanto a la eliminación de bacterias *E. coli*, coliformes totales y otras enterobacterias en la muestra de agua de río. El único material que presentó eliminación total de *E. coli* fue el TiO₂(F)-Ag (0.25%), lo que se puede atribuir al excelente desempeño, al efecto sinérgico del fotocatalizador y a la acción biocida de la plata foto depositada en la superficie del material. Así, se puede indicar que el efecto bactericida del fotocatalizador esta dado de diversas maneras, tales como: (i) interferir en la replicación del ADN, provocando la inhibición del crecimiento y la reproducción bacteriana; (ii) generar daño a la membrana celular, que puede ocasionar la pérdida de componentes celulares esenciales y la muerte celular; (iii) generación de ROS que pueden penetrar dentro de las células bacterianas para causar daño oxidativo a la estructura celular y contribuir a la destrucción de las bacterias; (iv) inhibición de enzimas, interfiriendo con su

función y provocando la inhibición del crecimiento bacteriano (Chaves & Martínez, 2023). Este mejor desempeño era de esperarse dadas las características del material como su elevada área superficial, su bajo tamaño de cristalito de anatasa y su aumento en la absorción de energía en la región visible, comparado con el $\text{TiO}_2(\text{F})$. Además, debido a la modificación del TiO_2 con metales nobles en superficie condujo a mejorar las propiedades fotoquímicas al actuar como trampas de electrones, evitando la recombinación del par electrón-hueco, reduciendo el ancho de banda o agregando nuevos niveles de energía para absorber la luz visible del espectro electromagnético (Aravind et al., 2023).

La eficiencia en la eliminación de *E. coli* para los demás materiales se dio en el siguiente orden: $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Au (0.125\%)} > \text{TiO}_2(\text{F}) > \text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag (0.125\%)} > \text{TiO}_2(\text{F})\text{-Au (0.25\%)}$. Esto nos confirma que los microorganismos son capaces de generar resistencia a los ataques de las ROS sobre la pared celular mediante mecanismos de reparación que implican la generación de enzimas reparadoras (Carvajal, 2019), lo que permite encontrar microorganismos vivos después del tratamiento fotocatalítico.

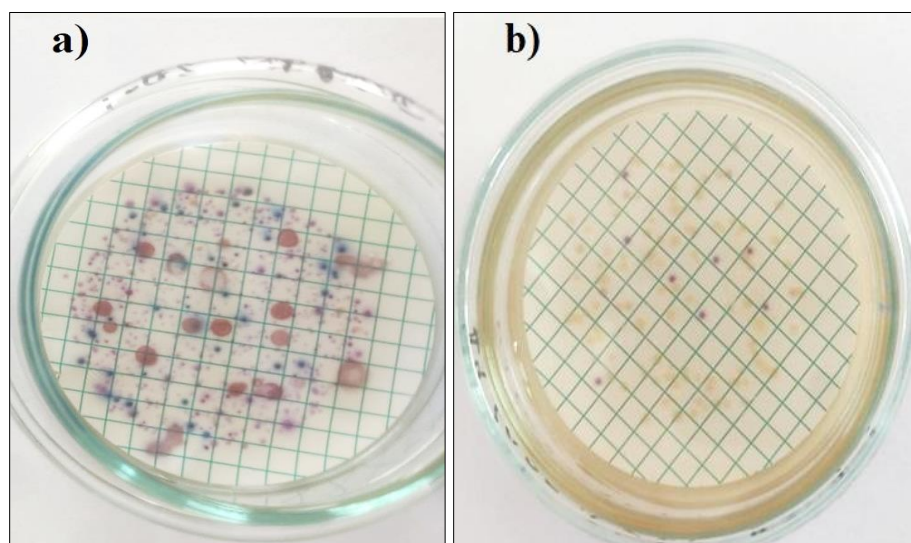
En la eliminación de coliformes totales, el fotocatalizador que presentó el mejor desempeño fue $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Au (0.125\%)}$, sin embargo, la diferencia en el desempeño de los demás materiales en este caso no es significativa. El material que presentó el desempeño más bajo en la eliminación de *E. coli*, coliformes totales y otras enterobacterias fue $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Au (0.25\%)}$, esta disminución de la actividad fotocatalítica podría deberse a la formación de conglomerados de partículas de oro que pueden actuar como centros de recombinación, reduciendo así la efectividad de estas muestras.

Por otra parte, en la Figura 10a se evidencian las colonias de los diferentes tipos de bacterias que crecieron en la caja de Petri de la muestra sin tratar. Las colonias azul violeta

corresponden a *E. coli*, las de color rosa corresponden a bacterias de tipo coliforme, y las colonias de color blanco-crema corresponden a otras enterobacterias. En la Figura 10b se observa de forma microscópica la eliminación de bacterias después del mejor tratamiento fotocatalítico.

Figura 10

Colonias de bacterias en cajas de Petri para la muestra de agua del Río Chicamocha a) Antes del tratamiento b) Después del tratamiento fotocatalítico con $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.25%).



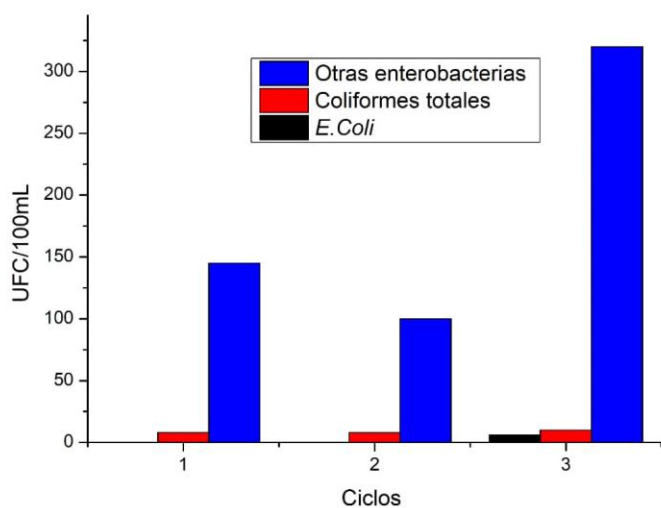
Fuente: La autora

Se realizó el reecimiento de la muestra con eliminación total de *E. coli*, para analizar si los mecanismos microbianos de defensa se activaban o sí existe latencia de las bacterias. El resultado de los ensayos de laboratorio no presentó reecimiento de *E. coli* después de las 24 y 48 horas de tratamiento del agua conservada a temperatura ambiente, por lo que se confirma la eliminación total de esta bacteria en el agua de río tratada por fotocátalisis con $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.25%).

Por otro lado, también se evaluó la estabilidad del fotocatalizador hasta en tres reúsos como se evidencia en la Figura 11, donde se observa que permanece estable por dos ciclos pero que en el tercer uso pierde actividad el fotocatalizador, dado que ya no presenta eliminación total de las *E. coli* y se disminuye la efectividad en la eliminación de otras enterobacterias.

Figura 11

Población de bacterias después de cada reuso del fotocatalizador $TiO_2(F)-Ag$ (0.25%).



Fuente: La autora

Se observó que la cantidad de coliformes totales es estable en los 3 ciclos. Lo anterior, se atribuye a múltiples factores que inciden en el crecimiento de las bacterias, estos son algunos de ellos:

✓ Resistencia bacteriana: Las bacterias pueden desarrollar resistencia a los antibióticos, metales pesados, desinfectantes y otros compuestos debido a mecanismos de resistencia similares (Huo et al., 2023). Esto debido a las condiciones adversas, como la acción de ROS generadas durante el tratamiento fotocatalítico. Atribuido también, a la resistencia

intrínseca por las propiedades bacterianas de inactivación y al mecanismo de bloqueo (Maldonado, 2009).

✓ Inactivación incompleta: El tratamiento fotocatalítico puede que no sea completamente efectivo en inactivar todas las bacterias presentes. Factores como la concentración inicial de bacterias, la intensidad de la luz y la duración del tratamiento pueden afectar la eficacia (Vargas & Rodríguez, 2014).

✓ Presencia de materia orgánica: La materia orgánica en el medio puede limitar la efectividad del tratamiento fotocatalítico. La materia orgánica disuelta coexistente puede ocupar las vacancias positivas o agujeros fotogenerados y así prevenir la generación de ROS (Dong et al., 2023).

✓ Recolonización: Cuando en el medio tratado hay presencia bacteriana en estado de latencia, es posible que las bacterias vuelvan a colonizar el agua tratada. La falta de competencia puede inducir la recolonización por bacterias oportunistas (estrategas), con un aumento significativo en el número de bacterias (Hess et al., 2010).

✓ Condiciones ambientales favorables: Después del tratamiento, las condiciones ambientales pueden volverse propicias para el crecimiento bacteriano. Factores como temperatura, humedad y presencia de nutrientes pueden influir en la viabilidad y el crecimiento bacteriano (Caycedo et al., 2021). La temperatura es un factor clave ya que afecta el cambio de la calidad del agua porque controla la actividad microbiana (Kim & Corapcioglu, 2002).

Conclusiones

Se sintetizaron y caracterizaron materiales fotocatalíticos basados en $\text{TiO}_2(\text{F})$ y modificados por foto deposición de Ag o Au, observando que los materiales con las modificaciones presentaron mejores características fisicoquímicas en cuanto al aumento de área superficial y disminución del ancho de banda. Lo que favorece la eficiencia del proceso fotocatalítico.

El mejor resultado se obtuvo con el fotocatalizador $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.25%), ya que presentó eliminación del 100% para *E. coli* sin recrecimiento después de las 48 horas de tratada el agua; el 99,72% en eliminación de coliformes totales y 92,16% en eliminación de otras enterobacterias. A causa de las nanopartículas de Ag pueden mejorar la propiedad de absorción en el espectro visible, optimizar la eficiencia en la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), optimizar la actividad antibacteriana y el rendimiento fotocatalítico del TiO_2 al liberar iones metálicos, por lo que ejercen un efecto biocida intrínseco al interactuar con las células.

La fotocatalisis heterogénea resultó ser una técnica eficiente y práctica para garantizar la eliminación total de las *E. coli* en el agua del afluente del Alto Chicamocha tratada durante 4 horas, con intensidad de luz de 30 W/m^2 , un flujo continuo de oxígeno de 35L/h, bajo agitación constante y usando como fotocatalizador $\text{TiO}_2(\text{F})\text{-Ag}$ (0.25%).

Recomendaciones

Se podrían realizar más investigaciones para explorar diferentes contenidos de metales en los materiales fotocatalíticos, estudiando así su correlación con el efecto bactericida y la degradación de contaminantes orgánicos.

Investigar a profundidad e identificar los microorganismos que están presentes en otras enterobacterias, facilitaría hallar el tratamiento adecuado para la eliminación total de este grupo de bacterias. Asimismo, sería interesante divulgar y aplicar estas técnicas de eliminación de microorganismos patógenos en la industria de alimentos, dado el impacto y la efectividad que implica para evitar que se generen ETAs y EDA por la contaminación del agua y de superficies.

Indagar técnicas para mejorar las propiedades de eliminación bacteriana del oro, ya que este metal cuenta con características prometedoras en el tratamiento fotocatalítico y esto permitiría abordar muchos estudios en tratamiento de aguas residuales por medio de la fotocátalisis heterogénea.

Referencias Bibliográficas

- Abril, F. G. M., Manrique, D. A., Abril, R. A. M., & Tejedor, M. F. (2007). Contaminación de la cuenca alta del río Chicamocha y algunas aproximaciones sobre la salud humana. *Revista Salud, Historia y Sanidad*, 2(1).
- Acevedo, A. C. (2011). Propuesta de reutilización del efluente de la planta de tratamiento Tryp Península en fuentes ornamentales y espejos de agua de los hoteles ubicados en el sector Punta Hicacos. *Revista de arquitectura e ingeniería*, 5(1).
- Aguirre F.J. (2019). *Estudio de fotocatalizadores nanoestructurados [SrAl₂O₄: Ln_x y TiO₂] para la posible eliminación de Cr⁶⁺ en efluentes de tenería* [Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Óptica A.C.]. Repositorio Institucional CIO. <http://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/1122>
- Araña, J., Dona-Rodríguez, J. M., González-Díaz, O., Rendón, E. T., Melián, J. H., Colón, G., & Peña, J. P. (2004). Gas-phase ethanol photocatalytic degradation study with TiO₂ doped with Fe, Pd and Cu. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 215(1-2), 153-160.
- Aravind, M., Amalanathan, M., Aslam, S., Noor, A. E., Jini, D., Majeed, S., & Sillanpaa, M. (2023). Hydrothermally synthesized Ag-TiO₂ nanofibers (NFs) for photocatalytic dye degradation and antibacterial activity. *Chemosphere*, 321, 138077.
- Ardila, C. A., & Gómez, N. I. (2017). *Estado del arte del distrito de riego Alto Chicamocha* [Tesis de pregrado, Universidad La Gran Colombia]. Repositorio Institucional La Gran Colombia. <http://hdl.handle.net/11396/5525>

- Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones (ANDESCO). (2022, 28 de abril). *Colombia avanza para llegar al 68% de aguas tratadas en el país*. <https://andesco.org.co/colombia-avanza-para-llegar-al-68-de-aguas-tratadas-en-el-pais/>
- Balloux, F., & van Dorp, L. (2017). Q&A: What are pathogens, and what have they done to and for us? *BMC biology*, *15*(1), 91.
- Baño, M. (2008). *Incidencia de microorganismos patógenos (Escherichia coli) en la contaminación microbiológica de comidas preparadas en el mercado central de la ciudad de Ambato* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional UTA. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/3379>
- Bergaglio, J., & Bergaglio, O. (2020). Contaminación de alimentos por *Escherichia coli* y la inocuidad alimentaria como eje fundamental. *Revista Argentina de Ciencia y Tecnología*, (5).
- Bermúdez, L. T., Páez, A. F., & Rodríguez, L. F. (2010). Impactos socioeconómicos y ambientales del Proyecto de Riego y Drenaje del Valle del Alto Chicamocha y Firavitoba, Boyacá (Colombia). *Agronomía Colombiana*, *28*(2), 337-344.
- Blanco, J. (2002). *Desarrollo de colectores solares sin concentración para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua* [Tesis doctoral, Universidad de Almería].
- Bolaños Acuña H. M., Acuña-Calvo M.T., Duarte-Martínez F., Salazar-Castro W., Oropeza-Barrios G, Sánchez-Salazar L. M. & Campos-Chacón E. (2007). Brotes de diarrea e intoxicaciones transmitidas por alimentos en Costa Rica, 2005. *Acta Médica Costarricense*, *49*(4), 205-209.

- Cabañas Vargas, D., Mota Poot, V., & Ruíz Espinoza, J. (2019). Luz solar y TiO₂ para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo: comportamiento de la fotocatalisis. *Ingeniería*, 23(1).
- Campos Díaz, J., Rodríguez Álvarez, C., Sierra López, A., & Arias Rodríguez, Á. (2003). Estudio microbiológico de las comidas servidas en los comedores escolares de la isla de Tenerife. *Revista española de salud pública*, 77, 749-760.
- Carriazo, J. G., Bossa-Benavides, L., & Castillo, E. (2012). Catalytic activity of transition metals in the hydrogen peroxide decomposition. *Química Nova*, 35, 1101-1106.
- Carvajal Carvajal, C. (2019). Especies reactivas del oxígeno: formación, función y estrés oxidativo. *Medicina Legal de Costa Rica*, 36(1), 91-100.
- Caycedo Lozano L., Corrales Ramírez L.C. & Trujillo Suárez D. M. (2021). Las bacterias, su nutrición y crecimiento: una mirada desde la química. *Nova*, 19(36), 49-94.
- Chaves, N. T., & Martínez, L. M. (2023). *Eficacia de las nanopartículas metálicas y bacteriófagos como agentes anti-biofilm (anti-biopelícula) para combatir la resistencia bacteriana, con énfasis en sus mecanismos de acción y espectros antimicrobianos* [Monografía, Universidad El Bosque]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12495/11475>
- Chen, M., Ma, J., Zhang, B., He, G., Li, Y., Zhang, C., & He, H. (2017). Remarkable synergistic effect between {001} facets and surface F ions promoting hole migration on anatase TiO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 207, 397-403
- Chiva, S, Berlanga Clavijo, J., Martínez, R., & Climent, J. (2016, 15 de enero). *Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua* [Ponencia] I Jornada Técnica sobre

Procesos de Oxidación Avanzada en el Ciclo Integral del Agua, Castellón de la Plana, España. <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/168282>

- Clemente, A. R., Chica Arrieta, E. L., & Peñuela Mesa, G. A.. (2013). Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes. *Revista Ambiente & Agua*, 8(3), 93–103.
- Coha, M., Farinelli, G., Tiraferri, A., Minella, M., & Vione, D. (2021). Advanced oxidation processes in the removal of organic substances from produced water: Potential, configurations, and research needs. *Chemical Engineering Journal*, 414, 128668.
- Contreras-Bermúdez, R. E. (2009). Degradación fotocatalítica de azul de metileno en aguas residuales utilizando TiO₂ como catalizador. *Revista latinoamericana de recursos naturales*, 5(2), 86-91.
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá [CORPOBOYACÁ]. (2019). *Informe de evaluación año 4 Cuenca Alta y Media Río Chicamocha*.
<https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2020/10/Informe-de-evaluaci%C3%B3n-a%C3%B1o-4-Cuenca-Alta-y-media-R%C3%ADo-Chicamocha.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá [CORPOBOYACÁ]. (2023). *Tasas retributivas*. <https://www.corpoboyaca.gov.co/proyectos/manejo-integral-del-recurso-hidrico/tasas-retributivas/>
- Cortés, J. A. (2009). *Foto Oxidación con TiO₂ de los Contaminantes Presentes en las Aguas Residuales con altos Niveles de Color* [Tesis de doctorado]. Repositorio Institucional CIMAV.<http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/354>

- Dong, S., Gong, Y., Zeng, Z., Chen, S., Ye, J., Wang, Z., & Dionysiou, D. D. (2023). Dissolved organic matter promotes photocatalytic degradation of refractory organic pollutants in water by forming hydrogen bonding with photocatalyst. *Water Research*, 242, 120297.
- Doña Rodríguez J.M., & Pulido Melián E. (2021). Nano-Photocatalytic Materials: Possibilities and Challenges. *Nanomaterials*.11(3):688.
- Dozzi, M. V., Montalbano, M., Marra, G., Mino, L., & Selli, E. (2021). Effects of anatase TiO₂ morphology and surface fluorination on environmentally relevant photocatalytic reduction and oxidation reactions. *Materials Today Chemistry*, 22, 100624.),
- Duran Juárez J.M., & Torres Rodríguez, A. (2006). Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media. *Espiral (Guadalajara)*, 12(36), 129-162.
- Emilio, C. A., Jardim, W. F., Litter, M. I., & Mansilla, H. D. (2002). EDTA destruction using the solar ferrioxalate advanced oxidation technology (AOT): Comparison with solar photo-Fenton treatment. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 151(1-3), 121-127.
- Empresa Social del Estado Centro de Salud de Firavitoba. (2019). *Vías de comunicación, Municipio de Firavitoba, Boyacá, 2019* [Mapa]. <http://www.boyaca.gov.co>
- Enwemeka, C. S., Williams, D., Enwemeka, S. K., Hollosi, S., & Yens, D. (2009). Blue 470-nm light kills methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in vitro. *Photomedicine and laser surgery*, 27(2), 221–226.
- <https://doi.org/10.1089/pho.2008.2413>

- Fernández, S., Marcía, J., Bu, J., Baca, Y., Chavez, V., Montoya, H., & Ore, F. (2021). Enfermedades transmitidas por Alimentos (ETAs); Una Alerta para el consumidor. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(2), 2284-2298.
- Ferro, G., Fiorentino, A., Alférez, M. C., Polo-López, M. I., Rizzo, L., & Fernández-Ibáñez, P. (2015). Urban wastewater disinfection for agricultural reuse: effect of solar driven AOPs in the inactivation of a multidrug resistant E. coli strain. *Applied Catalysis B: Environmental*, 178, 65-73.
- Flórez, I. D., Contreras, J. O., Sierra, J. M., Granados, C. M., Lozano, J. M., Lugo, L. H., & Sarmiento, F. (2015). Guía de Práctica Clínica de la enfermedad diarreica aguda en niños menores de 5 años. Diagnóstico y tratamiento. *Pediatría*, 48(2), 29-46.
- Fox, M.A. and Dulay, M.T. (1993). *Chemical Reviews*. No. 93, pp. 341-357.
- Friedmann, D. (2022). A general overview of heterogeneous photocatalysis as a remediation technology for wastewaters containing pharmaceutical compounds. *Water*, 14(21), 3588.
- Glaze, W. H., Kang, J. W., & Chapin, D. H. (1987). The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation.
- Hernández, M. S. (2017). *Floculación y fotocatalisis como procesos combinados en el tratamiento de aguas residuales derivadas de la producción industrial de lácteos* [Tesis de maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio Institucional UPTC. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2580>
- Hernández-Laverde, M., Murcia, J. J., Morante, N., Sannino, D., Vaiano, V., Navío, J. A., & Hidalgo, M. C. (2024). Photocatalytic activity enhancement by noble metal deposition on faceted F-TiO₂ synthesised by microwave assisted method. A study of

selective oxidation of gas-phase ethanol in a FBPR reactor. *Catalysis Today*, 114645.

Hess-Erga, O. K., Blomvågnes-Bakke, B., & Vadstein, O. (2010). Recolonization by heterotrophic bacteria after UV irradiation or ozonation of seawater; a simulation of ballast water treatment. *Water Research*, 44(18), 5439–5449.

Huo, M., Xu, X., Mi, K., Ma, W., Zhou, Q., Lin, X., & Huang, L. (2023). Co-selection mechanism for bacterial resistance to major chemical pollutants in the environment. *Science of The Total Environment*, 169223.

Ibhadon, A. O., & Fitzpatrick, P. (2013). Heterogeneous photocatalysis: recent advances and applications. *Catalysts*, 3(1), 189-218.

Instituto Nacional de Salud [INS]. (2019). Enfermedades Transmitidas por Alimentos. Instituto Nacional de Salud de Colombia. https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Informesdeevento/Enfermedades%20transmitidas%20por%20alimentos_2019.pdf

International Organization for Standardization (2014). *Water Quality-Enumeration of Escherichia coli and Coliform Bacteria; ISO: Geneva, Switzerland.*

Ismagilov, Z. R., Tsikoza, L. T., Shikina, N. V. E., Zarytova, V. F., Zinoviev, V. V., & Zagrebelnyi, S. N. (2009). Synthesis and stabilization of nano-sized titanium dioxide. *Russian Chemical Reviews*, 78(9), 873.

Kahrs, R. F. (1995). Principios generales de la desinfección. *Rev. sci. tech. Off. int. Epiz.* 14(1), 143-163.

Kelly, P. (2015). Infectious diarrhoea. *Medicine*, 43(5), 253-258.

- Khan, Z. U. H., Gul, N. S., Sabahat, S., Sun, J., Tahir, K., Shah, N. S., ... & Wu, J. (2023). Removal of organic pollutants through hydroxyl radical-based advanced oxidation processes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 267, 115564.
- Kim, S. B., & Corapcioglu, M. Y. (2002). Contaminant transport in riverbank filtration in the presence of dissolved organic matter and bacteria: a kinetic approach. *Journal of Hydrology*, 266(3-4), 269-283.
- Kitamura, S., Suzuki, T., Sanoh, S., Kohta, R., Jinno, N., Sugihara, K., & Ohta, S. (2005). Comparative study of the endocrine-disrupting activity of bisphenol A and 19 related compounds. *Toxicological Sciences*, 84(2), 249-259.
- Lara, M. A., Sayagués, M. J., Navío, J. A., & Hidalgo, M. C. (2018). A facile shape-controlled synthesis of highly photoactive fluorine containing TiO₂ nanosheets with high {001} facet exposure. *Journal of Materials Science*, 53(1), 435-446.
- Lubart, R., Lipovski, A., Nitzan, Y., & Friedmann, H. (2011). A possible mechanism for the bactericidal effect of visible light. *Laser therapy*, 20(1), 17-22.
- Mais, L., Palmas, S., Mascia, M., & Vacca, A. (2021). Effect of potential and chlorides on photoelectrochemical removal of diethyl phthalate from water. *Catalysts*, 11(8), 882.
- Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M. I., Blanco, J., & Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. *Catalysis today*, 147(1), 1-59.
- Maldonado, M. (2009). *Prevalencia de coliformes fecales y evaluación de su resistencia a los metales pesados Cu y Cd en suelo agrícola acondicionado con biosólidos* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMéx. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/80081>

- McGuigan, K. G., Conroy, R. M., Mosler, H. J., du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., & Fernández-Ibáñez, P. (2012). Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. *Journal of hazardous materials*, 235, 29-46.
- Medina, R. E. (2021). *Preparación y caracterización de dióxido de titanio dopado con cromo para aplicaciones fotocatalíticas* [Tesis de maestría, Universidad del Tolima]. Repositorio Institucional Universidad del Tolima.
<https://repository.ut.edu.co/handle/001/3497>
- Melgoza de la Fuente, José David (2009) *Degradación del azul de metileno en solución acuosa por los sistemas Fenton y foto-Fenton* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Institucional UANL.
<http://eprints.uanl.mx/id/eprint/21278>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Conozca cómo podría disminuir la demanda de agua en el sector agrícola. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/conozca-como-podria-disminuir-la-demanda-de-agua-en-el-sector-agricola/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Min ambiente y ANDI lanzaron resolución que permite el reúso de aguas residuales. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/minambiente-y-andi-lanzaron-resolucion-que-permite-el-reuso-de-aguas-residuales/>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (s.f.). Abecé Enfermedades Transmitidas por Alimentos. Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia.

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ET/abec-e-eta-final.pdf>

Ministerio de Salud y Protección Social. (2021). Análisis de la Situación de Salud en Colombia 2021. Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia.

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/ED/PSP/analisis-situacion-salud-colombia-2021.pdf>

Mixán, K. L., & Núñez, G. C. (2020). *Diseño de un sistema de reciclado de agua del proceso de remojo y pelambre para reducir el consumo de agua en la producción de cuero en la curtiembre Cuenca SAC* [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio Institucional UPAO.

<https://hdl.handle.net/20.500.12759/5996>

Murcia, J. J. (2013). *Control de la nanoestructura de sistemas M-TiO₂ (M= Pt y Au) preparados por foto deposición con propiedades fotocatalíticas optimizadas* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla]. Repositorio Institucional Universidad de Sevilla.

<http://hdl.handle.net/11441/53144>

Murcia, J. J., Hidalgo, M. C., Navío, J. A., Araña, J., & Doña, J. M. (2015). Study of the phenol photocatalytic degradation over TiO₂ modified by sulfation, fluorination, and platinum nanoparticles photo deposition. *Applied Catalysis B: Environmental*, 179, 305-312.

Murcia, J. J., Ávila-Martínez, E. G., Rojas, H., Navío, J. A., & Hidalgo, M. C. (2017). Study of the E. coli elimination from urban wastewater over photocatalysts based on metallized TiO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 200, 469-476.

- Murcia, J. J., Hernández-Laverde, M., Rojas, H., Muñoz, E., Navío, J. A., & Hidalgo, M. C. (2018). Study of the effectiveness of the flocculation-photocatalysis in the treatment of wastewater coming from dairy industries. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 358, 256-264.
- Nevárez-Martínez, M. C., Espinoza-Montero, P. J., Quiroz-Chávez, F. J., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *Avances en Química*, 12(2-3), 45-59.
- Olea, A., Díaz, J., Fuentes, R., Vaquero, A., & García, M. (2012). Vigilancia de brotes de enfermedades transmitidas por alimentos en Chile. *Revista chilena de infectología*, 29(5), 504-510.
- Oller, I., Malato, S., & Sánchez-Pérez, J. (2011). Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination a review. *Science of the total environment*, 409(20), 4141-4166.
- Organización de Naciones Unidas [ONU]. (2020). *Agua y saneamiento*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (s.f.). *Enfermedades transmitidas por alimentos*. <https://www.paho.org/es/temas/enfermedades-transmitidas-por-alimentos>
- Páez, C. G. (2009). *Determinación de coliformes fecales y totales en expendio de alimentos en establecimientos formales del macro distrito centro de la ciudad de La Paz, de septiembre a diciembre de 2007* [Tesis de pregrado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional UMSA. <http://hdl.handle.net/123456789/638>
- Palit, S., & Hussain, C. M. (2021). Advanced oxidation processes as nonconventional environmental engineering techniques for water treatment and groundwater

remediation. In Handbook of Advanced Approaches Towards Pollution Prevention and Control (pp. 33-44). Elsevier.

Parra, S. P. (2001). *Coupling of photocatalytic and biological processes as a contribution to the detoxification of water: catalytic and technological aspects* [Tesis doctoral, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Repositorio Institucional EPFL.

<https://infoscience.epfl.ch/record/32946>

Parra, M., Durango, J., & Máttar, S. (2002). Microbiología, patogénesis, epidemiología, clínica y diagnóstico de las infecciones producidas por Salmonella. *Revista MVZ Córdoba*, 7(2), 187-200.

Perales, I. A. (2015). *Síntesis de nanoestructuras a base de TiO₂ obtenidas por el método hidrotérmico asistido con microondas* [Tesis doctoral, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.]. Repositorio Institucional IPICYT. <http://hdl.handle.net/11627/3039>

Praveenkumar, T. R., Alahmadi, T. A., Salmen, S. H., Verma, T. N., Gupta, K. K., Gavurová, B., & Sekar, M. (2024). Impact of sludge density and viscosity on continuous stirred tank reactor performance in wastewater treatment by numerical modelling. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 105368.

Puga, F., Navío, J. A., Jaramillo-Páez, C., Sánchez-Cid, P., & Hidalgo, M. C. (2020). Microwave-assisted sol-gel synthesis of TiO₂ in the presence of halogenhydric acids. Characterization and photocatalytic activity. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 394, 112457.

- Rice, E. W., Bridgewater, L., & American Public Health Association (Eds.). (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater (*Vol. 10*). Washington, DC: American public health association.
- Rincón, A. G., & Pulgarín, C. (2003). Photocatalytical inactivation of *E. coli*: effect of (continuous–intermittent) light intensity and of (suspended–fixed) TiO₂ concentration. *Applied Catalysis B: Environmental*, *44*(3), 263-284.
- Rodríguez Pérez, A. U. (2006). La desinfección-antiseptia y esterilización en la atención primaria de salud: Laboratorios. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, *22*(3).
- Silvestre, C., Fagoaga, L., Garciandía, M., Lanzeta, I., Mateo, M., & Zapata, M. (2009). Esterilización. *Anales Del Sistema Sanitario De Navarra*, *23*, 95–103.
- Simbaña, A. Y. (2019). *Cuidados de enfermería en pacientes pediátricos con enfermedades diarreicas agudas en área de hospitalización del establecimiento de salud II-1 “Manuel Javier Nomberto” Chulucanas Piura 2018* [Tesis de especialización, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional UNAC.
<https://hdl.handle.net/20.500.12952/5434>
- Soto Varela, Z., Pérez Lavalle, L., & Estrada Alvarado, D. (2016). Bacterias causantes de enfermedades transmitidas por alimentos: una mirada en Colombia. *Revista Salud Uninorte*, *32*(1), 105-122.
- Torrens, H. R., Argilagos, G. B., Cabrera, M. S., Valdés, J. B., Sáez, S. M., & Viera, G. G. (2015). Las enfermedades transmitidas por alimentos, un problema sanitario que hereda e incrementa el nuevo milenio. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, *16*(8), 1-27.

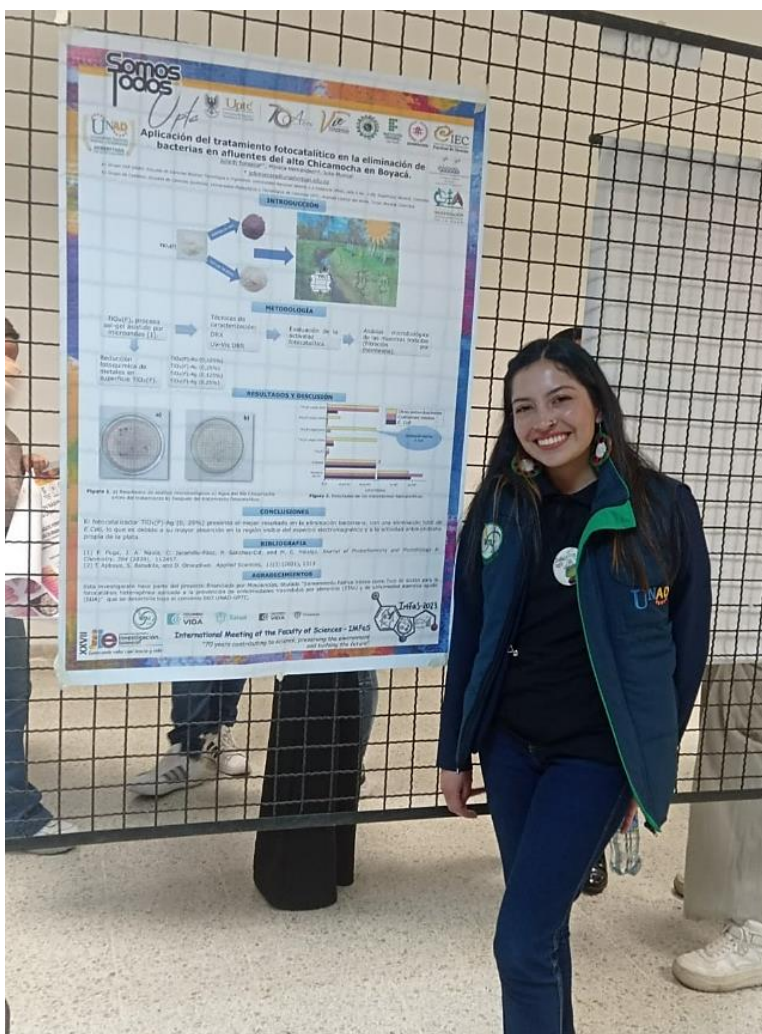
- Torres Becerril, M., Carmona García, R., & Aguirre Cruz, A. (2015). Obtención y caracterización estructural y funcional de almidón acetilado de malanga (*Colocasia esculenta* Schott). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(4), 905-912.
- Vaiano, V., Iervolino, G., Sannino, D., Murcia, J. J., Hidalgo, M. C., Ciambelli, P., & Navío, J. A. (2016). Photocatalytic removal of patent blue V dye on Au-TiO₂ and Pt-TiO₂ catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 188, 134-146.
- Vargas, M. A., & Rodríguez, J. E. (2014). Inactivación bacteriana por el efecto de Nanopartículas de TiO₂ amorfo. *Revista colombiana de materiales*, (5), 39-46.
- Villanueva, C. (2011). *Fotocatálisis con TiO₂/ultravioleta y TiO₂ CuSO₄/visible como sistemas de desinfección para inactivar E. coli proveniente de agua residual doméstica* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional Pontificia Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/1532>
- Wang, H., Li, X., Zhao, X., Li, C., Song, X., Zhang, P., & Huo, P. (2022). A review on heterogeneous photocatalysis for environmental remediation: From semiconductors to modification strategies. *Chinese Journal of Catalysis*, 43(2), 178-214.
- Wei, Z.; Endo-Kimura, M.; Wang, K.; Colbeau-Justin, C.; Kowalska, E. (2019). Influence of Semiconductor Morphology on Photocatalytic Activity of Plasmonic Photocatalysts: Titanate Nanowires and Octahedral Anatase Nanoparticles. *Nanomaterials*, 9, 1447.

Apéndices

Apéndice A

Presentación de póster en el International Meeting of the Faculty of Sciences- IMFaS-2023.

UPTC Tunja, 04 octubre 2023.



Nota: Gracias al desarrollo del presente proyecto de investigación, y al apoyo por parte de las instituciones, fue posible asistir a eventos científicos en calidad de ponente. *Fuente:* Autora

Apéndice B

Certificado ponencia en el International Meeting of the Faculty of Sciences- IMFAS-2023. UPTC Tunja, 04 octubre 2023.



Nota: Certificado de la participación en el IMFAS, este evento científico permitió la apropiación y divulgación de conocimiento. *Fuente:* Autora

Apéndice C. Preparación de Artículo científico

Los resultados del trabajo de investigación desarrollado hacen parte del artículo: M. Hernández-Laverde, J.J. Murcia, J.C. Fonseca, M.C. Hidalgo, J.A. Navío.

“Surface modifications on {001} faceted TiO₂ for photocatalytic activity enhancement in the degradation of caffeine and elimination of bacteria”. El cual está en preparación y será sometido a una revista científica de alto impacto.