

**Revisión sistemática de la aplicación de la especie reactiva oxígeno molecular singulete
(¹O₂) para la desinfección de aguas**

Jamir José Naranjo Diaz

Asesores

Quim MSc PhD Gloria María Doria Herrera

Ing. MSc Kevin Alberto Berthi Mantilla

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

2024

Kevin Alberto Berthi Mantilla

Jurado

Jurado

2024

Dedicatoria

Esta Dedico mi tesis principalmente a Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta.

A mis padres, por todo su amor y por motivarme a seguir hacia adelante.

A mis hermanos, por todo su apoyo incondicional y motivaciones.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional

Al profesor Kevin Berthi Mantilla y a la profesora Gloria Doria Herrera, quienes me brindaron su valiosa guía y asesoría para la elaboración de este proyecto.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente para la culminación este proyecto.

Resumen

El agua dulce representa solo el 2,5% del total de agua en la Tierra, y aunque Colombia es el tercer país con mayores reservas hídricas, gran parte de estas no son aptas para el consumo debido a la inadecuada eliminación de patógenos. Esto se debe a limitaciones en recursos y estrategias de desinfección. Existen métodos fisicoquímicos como la ebullición, rayos UV, cloración y los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO), entre los cuales destaca la fotosensibilización, que utiliza oxígeno molecular singulete ($^1\text{O}_2$) activado por radiación lumínica. Sin embargo, hay pocos estudios que demuestren su efectividad. En este contexto, se realizó una revisión sistemática sobre el uso de $^1\text{O}_2$ para la desinfección de aguas, buscando alternativas sostenibles que mejoren la calidad del agua potable y contribuyan al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6: acceso universal a agua limpia y saneamiento. Para ello, se analizaron publicaciones en bases de datos como ScienceDirect, Springer Link, Scopus, y Google Académico, utilizando ecuaciones de búsqueda con palabras clave relacionadas. La búsqueda inicial arrojó 6269 artículos, siendo ScienceDirect la base con mayor representación (44.79%). Se empleó la metodología PRISMA para seleccionar los artículos más relevantes, evaluando criterios como título, objetivos, metodología, resultados y conclusiones, con una rúbrica de puntuación. Los artículos mejor valorados se gestionaron en Mendeley. Los resultados destacan el interés interdisciplinario en este campo y compararon la efectividad de la fotosensibilización con métodos tradicionales de desinfección. Esta investigación propone que $^1\text{O}_2$ es una alternativa viable para mejorar la calidad del agua potable, reduciendo los efectos adversos de otros métodos y ofreciendo soluciones adaptables a diferentes contextos. Este enfoque refuerza la importancia de tecnologías innovadoras y sostenibles en el manejo del recurso hídrico, respondiendo a desafíos globales en desinfección y saneamiento.

Palabras clave: Desinfección - Fotosensibilización- Oxidación avanzada-Calidad del agua.

Abstract

Freshwater represents only 2.5% of the Earth's total water, and although Colombia is the third country with the largest water reserves, much of it is not suitable for consumption due to inadequate pathogen removal. This issue arises from limitations in resources and disinfection strategies. Physicochemical methods such as boiling, UV rays, chlorination, and Advanced Oxidation Processes (AOPs) are available, with photosensitization standing out. This method uses singlet oxygen ($^1\text{O}_2$) activated by light radiation. However, there are few studies demonstrating its effectiveness. In this context, a systematic review was conducted on the application of $^1\text{O}_2$ for water disinfection, seeking sustainable alternatives to improve potable water quality and contribute to Sustainable Development Goal (SDG) 6: universal access to clean water and sanitation. For this purpose, publications from databases like ScienceDirect, Springer Link, Scopus, and Google Scholar were analyzed using search equations with related keywords. The initial search yielded 6,269 articles, with ScienceDirect being the database with the highest representation (44.79%). The PRISMA methodology was used to select the most relevant articles, evaluating criteria such as title, objectives, methodology, results, and conclusions through a scoring rubric. The best-rated articles were managed by Mendeley. The results highlight the interdisciplinary interest in this field and compared the effectiveness of photosensitization with traditional disinfection methods. This research suggests that $^1\text{O}_2$ is a viable alternative to improve potable water quality, reduce the adverse effects of other methods, and offer adaptable solutions for different contexts. This approach underscores the importance of innovative and sustainable technologies in water resource management, addressing global challenges in disinfection and sanitation.

Keywords: Disinfection - Photosensitization - Advanced Oxidation - Water Quality.

Tabla de contenido

Introducción	13
Planteamiento del Problema	15
Justificación	21
Objetivos	26
Objetivo General	26
Objetivos Específicos.....	26
Marco conceptual.....	27
Fotosensibilización	27
Fotosensibilizadores y Tipos de Fotosensibilizadores	31
Propiedades de los Fotosensibilizadores.....	35
Generación de Oxígeno Molecular Singlete en el Ambiente.....	35
Sustancias Húmicas	36
Importancia Ambiental de las Sustancias Húmicas	38
Desinfección y Algunos Métodos de Desinfección	40
Métodos de desinfección químicos con uso de Cloro.....	41
Procesos Avanzados de Oxidación	44
Desinfección de Agua Potable Mediante Oxígeno Singlete	45
Variables significativas en la desinfección por métodos de fotosensibilización	45
Metodología	53
Recopilación de la Información a través de las Bases de Datos.....	53
Análisis de parámetros significativos en la desinfección	55
Resultados y Análisis de Resultados.....	56

Resultados del Análisis Bibliométrico.....	56
Selección de Artículos	59
Análisis de Variables en el Proceso de Desinfección por Fotosensibilización.....	61
Comparación acerca de la Eficiencia de la Especie Reactiva Oxígeno Molecular Singlete ($^1\text{O}_2$) con Relación a otros Métodos de Desinfección.....	74
Algunas Limitaciones o Desventajas en el Uso de Oxígeno Singlete como Desinfectante de Agua Potable.....	79
Conclusiones.....	82
Referencias bibliográficas.....	85
Apéndices.....	100

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Características microbiológicas</i>	18
Tabla 2 <i>Parámetros de desinfección por radiación ultravioleta</i>	19
Tabla 3 <i>Rubrica de evaluación basado en metodología PRISMA</i>	54
Tabla 4 <i>Comparación de la eficiencia de la especie reactiva oxígeno molecular singulete (1O_2) con otros métodos de desinfección</i>	76

Lista de Figuras

Figuras 1 <i>Mecanismo del proceso de fotosensibilización</i>	28
Figuras 2 <i>Dstrucción de microorganismos no deseados bacterias, hongos y virus</i>	29
Figuras 3 <i>Diagrama de Jablonski para el proceso de sensibilización del oxígeno singlete</i>	30
Figuras 4 <i>Rosa de Bengala (RB)</i>	32
Figuras 5 <i>Azul de Metileno (MB)</i>	33
Figuras 6 <i>Bis (2,2 -Bipiridina) (1,10-Fenantrolina-5,6-diona) Rutenio (II) (Complejo 1)</i>	33
Figuras 7 <i>Tris (1,10-phenanthroline-5,6-dione) Rutenio (II) (Complejo 2)</i>	33
Figuras 8 <i>Hematoporfirina (Hp)</i>	34
Figuras 9 <i>5,15-Di(N-metil-4-Piridinio) Porfirina (DMPyP)</i>	34
Figuras 10 <i>Zinc (II) Talocianina Acido tetrasulfónico Sal tetrasodio (ZnPcS)</i>	34
Figuras 11 <i>Estructura de Ácido húmico</i>	37
Figuras 12 <i>Estructura de Ácido fúlvico.</i>	38
Figuras 13 <i>Ruta Metodológica de la Investigación</i>	53
Figuras 14 <i>Publicaciones halladas con relación a las bases de datos consultadas</i>	57
Figuras 15 <i>Publicaciones encontradas con algoritmo de búsqueda</i>	58
Figuras 16 <i>Publicaciones para algoritmo de búsqueda en motores de búsqueda</i>	59
Figuras 17 <i>Esquema de Selección de artículos</i>	60
Figuras 18 <i>Medidas de pH</i>	63
Figuras 19 <i>Medidas de Longitud de Onda</i>	65
Figuras 20 <i>Medidas de la Intensidad Luminosa</i>	67
Figuras 21 <i>Tiempo de exposición reportado en los artículos</i>	69
Figuras 22 <i>Eficiencia reportada durante la desinfección</i>	73

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Matriz de Evaluación de Artículos Científicos</i>	100
--	-----

Introducción

El poco acceso al agua potable es uno de los principales problemas que se tienen en muchos países en vía de desarrollo en Latinoamérica y el Caribe, así como en África y parte de Asia, en donde superar esta situación se ha convertido en uno de los principales desafíos que afronta la humanidad en el presente siglo. Poder superar el problema del desabastecimiento del agua, resulta una prioridad, ya que, todos los organismos vegetales y animales, incluidos los humanos necesitan agua para su supervivencia, y aunque este problema, en lugar de hallar una solución, podría empeorar en el futuro debido al cambio climático, cuya afectación directa, aparece en el ciclo hidrológico y tanto en la cantidad como en la calidad de los recursos hídricos. Otros factores como el crecimiento demográfico, la industrialización, el crecimiento económico, el cambio social, la innovación tecnológica, las políticas ambientales también realizan presión sobre los recursos hídricos.

El aumento de la población humana y la industrialización han producido una extensa gama de contaminantes fisicoquímicos y patógenos en los cuerpos de agua, lo que ha puesto en peligro la salud humana, afectada por la falta de salubridad de dicho recurso hídrico, lo que impide un saneamiento e higiene adecuados y a su vez aumenta el riesgo de contraer y transmitir enfermedades transmitidas por el agua.

Por lo anterior, en esta investigación efectuó una búsqueda bibliográfica con la que se logró establecer la aplicación de la especie reactiva oxígeno molecular singulete ($^1\text{O}_2$) para la desinfección de aguas y con ello poder evidenciar que otras soluciones pueden existir para que el problema de insalubridad y desabastecimiento en el recurso hídrico mejore y con ello poder explorar acerca de una alternativa viable y sostenible para mejorar la calidad del agua potable, reduciendo los efectos adversos de los métodos tradicionales y ofreciendo soluciones adaptables

a diferentes escenarios, con esto, se busca aportar a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente al ODS 6, que promueve el acceso universal a agua limpia y saneamiento, y presenta un retraso moderado, con indicadores fundamentales distanciándose del objetivo para 2030. De acuerdo con el indicador de acceso a agua potable, se registró una reducción del 93,5% al 90,3% entre 2020 y 2021, siendo las áreas rurales las más perjudicadas con una disminución del 76,1% al 66,9%. La proporción de personas con acceso a técnicas de saneamiento apropiadas también experimentó una reducción, pasando del 93,4% al 88,6% durante el mismo lapso.

Es así como, primero se realizó una compilación de documentación especializada, visitando motores de búsqueda y bases de datos tales como: Dialnet, ACS, Oxford Journals, Redalyc, Redalyc, Sage, Scielo, Scielo, ScienceDirect, Scopus, Springer Link, Taylorfrancis, y Google Académico. En el presente trabajo, se construyó una rúbrica de puntuación basada en la metodología PRISMA para evaluar nueve criterios en los artículos seleccionados a saber: título, DOI, resumen, introducción, objetivos, metodología, resultados, conclusiones y referencias. Se asignaron valores de revisión a cada criterio, bajo (0.5), medio (1.0) y alto (1.5) y los artículos mejor valorados se almacenaron en el gestor bibliográfico Mendeley para construir una base de datos. Se analizaron diferentes variables relacionadas con la desinfección y se utilizaron gráficos Boxplot e Histogramas para visualizar los datos obtenidos. Finalmente, se comparó la efectividad del tratamiento con otros métodos tradicionales de desinfección.

Planteamiento del Problema

El acceso al agua potable es un propósito importante en materia de salud pública y desarrollo de cada gobierno a nivel regional, local, nacional y mundial. Cada día este recurso aparece más vulnerable a la contaminación de manera natural o por acción directa o indirecta del hombre y con ello hacen su aparición algunas enfermedades relacionadas con la contaminación del agua, sobre todo el agua para consumo humano (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF], 2017).

La aparición de riesgos epidemiológicos asociados al consumo de agua con presencia de agentes microbiológicos, causantes de enfermedades tales como la cólera, fiebres tifoideas o la hepatitis vírica, es de gran relevancia para las entidades gubernamentales encargadas de brindar las regulaciones de saneamiento básico ya que causan un gran impacto en la población (Pozo Soto, 2009). Debido a esta problemática se hace necesario la aplicación de tecnologías que permitan dar respuesta a esta problemática, de manera efectiva, asequible y que sea amigable con el medio ambiente.

Entre las metodologías más comunes se destaca la cloración que es un método eficiente como biocida, además de mejorar los procesos de coagulación y filtración, porque ayuda a que se produzca con mayor facilidad, la remoción de materia orgánica, color, olores y sabores, y metales disueltos como el hierro y manganeso. (Ramírez Quirós, F, 2005), sin embargo, dentro de sus desventajas se destaca que, exista la posibilidad en la formación de cloroformo y de otros trihalometanos (THMs) en el agua potable, cuya concentración aumenta de forma directa con la concentración de residual del cloro, Y aunque los riesgos para la salud humana estos subproductos de la desinfección son pequeños, comparados a los riesgos asociados a las enfermedades de transmisión hídrica, puede decirse que, la exposición a estos contaminantes a

través del agua clorada durante largos periodos de tiempo, da lugar a efectos adversos para la salud, con la aclaración de que, dicha exposición a estos agentes no ocurre sólo por la ingestión de agua, sino además por la inhalación y la absorción dérmica, considerándose los de mayor prevalencia: daño en las funciones reproductoras, daños en el desarrollo fetal dentro del útero, y desarrollo de cáncer, sobre todo en el de vejiga urinaria (Olmedo Sánchez, 2008). Así mismo, otro método ampliamente utilizado se relaciona con el uso de lámparas UV, cuyo mecanismo de desinfección se fundamenta en un fenómeno físico por el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta afectan el material genético (ADN) de los microorganismos y los virus, destruyéndolos en corto tiempo, sin ocasionar cambios fisicoquímicos considerables en el agua tratada (Solsona & Méndez, 2002), siendo este método de tratamiento un método efectivo, sin embargo, es de importancia resaltar que si al existir compuestos persistentes en el agua a tratar por acción del fotólisis pueden generar compuestos de alta peligrosidad para los seres humanos (Chiva et al., 2017), además de la generación de resistencia por parte de las bacterias, y también elevados costos a la aplicación de ciertas tecnologías. (Simpson & Hayes, 1998); (Gamage & Zhang, 2010).

En términos de salud para los seres humanos, resulta de mucha importancia tanto la limpieza del agua como su calidad, en donde el agua que es considerada pura es saludable y no alberga microorganismos que causan enfermedades ni productos químicos tóxicos, además de incluir los minerales necesarios en proporciones equilibradas (Ríos-Tobón et al., 2017), por ello es de alta importancia para el consumo humano, el agua debe cumplir con ciertas condiciones de calidad. Dentro de los factores básicos para determinar la calidad del agua son: la temperatura el oxígeno disuelto, el pH, conductividad, turbiedad, alcalinidad, contaminantes orgánicos/inorgánicos. Por otra parte, la turbiedad es una expresión de la propiedad óptica del

agua que provoca la dispersión de la luz y se mide determinando el grado de dispersión de la luz por las partículas presentes en las muestras, ha sido una medida que ha sido utilizada para medir la calidad del agua, y además a menudo su aumento se ha estado asociada con un aumento en el recuento total de placas o número de microorganismos viables en el agua y un aumento de los Coliformes y puede ser el resultado de un tratamiento incompleto, impurezas debidas al material de las tuberías o reparación llevadas a cabo en las líneas de un sistema. Su naturaleza no puede relacionarse necesariamente con la cantidad de partículas presentes o con el tamaño, la forma y la naturaleza química de las partículas, está relacionada con la desinfección y es de importancia primordial ya que la desinfección es la barrera final del tratamiento (McCoy & Olson, 1986). También es importante mencionar que los olores y sabores desagradables se han asociado con altas turbiedades, así mismo, la turbiedad puede transportar nutrientes para favorecer el crecimiento microbiano en el sistema de distribución, el consiguiente recuento estándar de placas puede enmascarar la detección de Coliformes (Lechevallier, et al., 1981), además de la presencia de microorganismos tales como *Bacteroides fragilis*, bacterias mesófilas, coliformes totales, y fecales [termotolerantes], *Escherichia coli* y estreptococos fecales (K Boyraz et al., 2019) y (Ríos-Tobón et al., 2017). Para la FDA¹ y la EPA², la calidad del agua debe tener como máximo nivel de contaminantes: Coliformes Totales (incluyendo, Coliformes fecales y *Escherichia coli*) 0, *Legionella* 0, *Cryptosporidium* 0, *Giardia lamblia* 0, Virus (entérico) 0.

La normatividad colombiana, establece mediante la Resolución 2115 de 2007 las técnicas aceptadas para realizar los análisis microbiológicos del agua para consumo humano son las siguientes:

¹ Administración de Medicamentos y Alimentos (FDA, por sus siglas en inglés)

² United States Environmental Protection Agency

El análisis de *Escherichia coli* y Coliformes totales, se lleva a cabo mediante, Filtración por membrana, sustrato definido, enzima sustrato y presencia – ausencia, adoptándose otras técnicas y metodologías debidamente validadas por el Instituto Nacional de Salud - INS - o éste realizará una revalidación con base en documentación soportada de organismos internacionales que presenten los interesados. En cuanto al análisis de *Giardia* y *Cryptosporidium*, las técnicas y metodologías de análisis para estos microorganismos deben ser validadas por el Instituto Nacional de Salud – INS - o éste realizará una revalidación con base en documentación soportada de organismos internacionales que presenten los interesados y las determinadas características microbiológicas aceptadas para el agua de consumo humano se establecen en la tabla 1; teniendo en cuenta límites de confianza del 95 % y técnicas con cualidad de detección desde 1 Unidad Formadora de Colonia (UFC) o 1 microorganismo en 100 cm³ de muestra, además se considera que, el valor aceptable, para *Giardia*, Quistes, *Cryptosporidium* y Ooquistes es de cero (0) por volumen fijado según cual sea la metodología aplicada. Es importante mencionar que independientemente del método de análisis utilizado, ninguna muestra de agua para consumo humano debe contener *Escherichia coli* en 100 cm³ de agua. También de manera complementa, es recomendable realizar la determinación de microorganismos mesofilicos, cuyo valor máximo aceptable será de 100 UFC en 100 cm³.

Tabla 1

Características microbiológicas

Técnicas Utilizadas	Coliformes Totales	Coliformes Fecales (<i>Escherichia coli</i>)
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm ³	0 UFC/100 cm ³
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismos en 100 cm ³	< de 1 microorganismos en 100 cm ³
Sustrato Definido	0 microorganismos en 100 cm ³	0 microorganismos en 100 cm ³
Presencia – Ausencia	Ausencia en 100 cm ³	Ausencia en 100 cm ³

Nota: Esta tabla muestra las características microbiológicas aceptadas para el agua de consumo humano. Fuente: Resolución 2115 de 2007

Para los casos en que, de acuerdo con la inspección sanitaria en campo, el mapa de riesgo de la cuenca abastecedora y los análisis de caracterización de agua cruda realizados, se confirme la presencia de protozoos tipo *Giardia* y *Cryptosporidium*, deberá contar con un sistema de desinfección eficiente para la eliminación de estos protozoos. En el caso de diseñar un sistema de desinfección por radiación ultravioleta (inactivación para 3 log). Los parámetros de referencia para el diseño del proceso son los presentados en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros de desinfección por radiación ultravioleta

Parámetro	Valor
Longitud de onda	254 nm
Valor de transmitancia	75 – 95 %
Dosis de luz para <i>Giardia</i> y <i>Cryptosporidium</i>	80 - 82 mW s/cm ²
Dosis de luz para virus	7 - 12 mW s/cm ²
Dosis de luz para bacterias	2,1 - 12 mW s/cm ²

Nota: En esta tabla se dan a conocer los parámetros de referencia para el diseño del proceso.

Fuente: Resolución 0330 de 2017

Los reactores de luz ultravioleta que se requieren son de tipo canal abierto, canal cerrado sin contacto o contacto en canal cerrado; cualquiera de ellos deberá diseñarse garantizando mezcla completa transversal. Por ello, es importante que las condiciones de calidad se mantengan con el propósito de preservar la calidad de la vida humana.

Gracias a esta imperiosa necesidad de buscar estrategias integrales que permitan no solo la acción de desinfectar aguas, sino que a su vez elimine estos compuestos orgánicos persistentes (Guillard et al., 2008), se ha valorado el uso del oxígeno molecular singulete ya que es

considerada una tecnología limpia, dado que al tener un material fotosensibilizador idealmente fijado en material polimérico, el cual en presencia de una fuente de energía (luz) logra generar la especie oxidante y a su vez funcionar como bactericida (Spesia et al., 2008). Existen estudios que corroboran la capacidad bactericida de la especie oxidante, sin embargo, a la fecha no se ha realizado revisiones bibliográficas que den cuenta de las variables de operaciones que se deben contemplar para la puesta en marcha de esta tecnología. Por ello se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Es la especie oxígeno molecular singulete una buena tecnología para la desinfección de aguas?

Dentro de la hipótesis planteada en esta investigación y basados en la literatura previa, se puede presumir que es una buena metodología de desinfección para aguas potables.

Justificación

La conservación del agua es muy importante, y más aún en áreas en donde este recurso es limitado, y consecuentemente este recurso posee las características óptimas para el consumo humano. La Organización Mundial de la Salud (OMS), estima que el 10 % de la población mundial consume alimentos regados con aguas residuales sin tratar, y que el 32 % de la población mundial no posee un saneamiento básico adecuado, lo que causa unas 280 000 muertes relacionadas con enfermedades de origen hídrico (Del Puerto Rodríguez et al.,1999). Las aguas no tratadas llegan a los cuerpos de agua que son utilizados para riego de cultivos que, posteriormente son ingeridos de manera directa por el ser humano o indirectamente por animales que más tarde son consumidos por los humanos ocasionando así riesgos para la salud. (Rodríguez-Miranda et al., 2017).

Poder tener acceso al agua potable resulta esencial para la salud humana, siendo uno de los derechos humanos básicos y un elemento importante de las políticas eficaces de protección de la salud. Por consiguiente, la inversión realizada en la potabilización del agua resulta imprescindible, para lograr una mayor cobertura en el servicio a dicho recurso (World Health Organization [WHO], 2017). Potabilizar el agua es el proceso o procesos a que el agua es sometida, para poder ser consumida por el ser humano, sin que se convierta en un riesgo para la salud, esto significa lograr hacerla apta para su consumo; luego de ser sometida el agua bruta a una sucesión de procesos tanto físicos como químicos para eliminar la materia orgánica e inorgánica y aquellos contaminantes de tipo biológicos, presentes en el agua y que muestren un potencial riesgo para la salud de los seres humanos, por tanto, involucra el tratamiento de aguas superficiales o subterráneas para obtener agua potable con la calidad de conformidad con las normas establecidas para la calidad del agua de consumo humano, este proceso integra el sistema

de abastecimiento de agua potable que permite conducir el recurso hídrico hasta el usuario final y está constituido de acuerdo a las fases de captación, potabilización, almacenamiento, distribución y transporte y por último vigilancia y control. La captación es el sistema que permite dirigir el caudal requerido, desde la fuente de abastecimiento hacia el sistema de agua potable. El agua cruda puede tener un origen en aguas superficiales como ríos, lagos, embalses, canales o en aguas subterráneas como pozos, manantiales. La potabilización se efectúa en una planta potabilizadora, utilizando distintos tratamientos que logran hacer que el agua pueda ser apta para el consumo humano y satisfacer necesidades. El almacenamiento se realiza en tanques o depósitos destinados para el mismo, provistos de buena protección, conservación y limpieza, para garantizar que la calidad del agua potable conserve todas las características de su tratamiento. La distribución y transporte hace referencia a un conjunto de conductos, canales y tuberías por los cuales se lleva el agua potable a las redes de distribución y consumidores finales. La vigilancia y el control, se llevan a cabo tanto análisis químicos como biológicos de diferentes parámetros del agua con el fin de asegurar su calidad y potabilidad a la salida de la planta de potabilización y en distintos puntos de la red de abastecimiento (WHO, 2018).

En este sentido, la potabilización del agua se lleva a cabo principalmente a través de 6 pasos: el pre-tratamiento, coagulación y floculación, sedimentación, filtración, desinfección y análisis. Como primer paso se realiza el pre-tratamiento, en el que se logra eliminar sólidos de gran tamaño presentes en el agua, ramas, hojas, basura y demás partículas de gran tamaño, que podrían interferir con los pasos de la purificación subsecuentes. En la coagulación y floculación, con la ayuda de bombas de baja presión se realiza el transporte del agua hacia una cámara de mezcla, donde se añaden elementos que favorecen la potabilización del agua, se ajusta el pH con la adición de ácidos o bases y se agregan agentes coagulantes que ayudan a la clarificación. La

sedimentación se logra haciendo pasar el agua hasta un tanque de sedimentación con flujo lento, en donde las partículas en suspensión, contenidas en agua, se separan por gravedad y los sedimentos con mayor densidad se almacenan en el fondo, donde son eliminados. (Kostoff et al., 2008). La coagulación, la floculación y la sedimentación, son etapas que se complementan, actúan para separar los sólidos de la fase líquida cuando las partículas se depositan por gravedad. Los agentes microbianos (protozoos, bacterias y virus) tienden a sorberse en la coagulación o floculación y, por tanto, se eliminan (Omarova et al., 2018). En la filtración, el agua se hace pasar a través de un medio poroso, o filtro para eliminar los sedimentos de menor densidad. Con un diseño y un funcionamiento adecuados, la filtración puede servir de barrera consistente y eficaz para los patógenos microbianos. La filtración rápida, como un simple filtro de malla, no elimina eficazmente los patógenos microbianos. Los filtros de arena lentos pueden ser muy eficaces para eliminar la contaminación microbiana del agua (Omarova et al., 2018). Como penúltimo paso, la desinfección, se realiza como componente esencial para la mayoría de las instalaciones de tratamiento, especialmente para las que utilizan aguas superficiales, ya que el material filtrante granular por sí solo no elimina la mayor parte de los patógenos del agua, por tanto, de manera usual, se añade cloro para eliminar cualquier tipo de bacteria o virus (Omarova et al., 2018). El cloro es el desinfectante más utilizado para el tratamiento del agua potable en muchos países desarrollados y en vía de desarrollo, su uso tiene una larga historia en el tratamiento del agua, y se ha utilizado con éxito tanto para el agua potable como para las aguas residuales, aunque actualmente, la investigación se concentra en desinfectantes alternativos como el dióxido de cloro, el ozono y la radiación UV (Omarova et al., 2018). Por último, finalizado el proceso de potabilización, se realizan varios análisis del agua para certificar que dicho proceso, se ha llevado a cabo con éxito. El agua potable debe ser incolora, inodora e insípida y cumplir

con la normatividad vigente de cada país, para tal fin (WHO, 2018). Cabe mencionar que, llevar a cabo un proceso de saneamiento hídrico adecuado no garantiza, que se realice un proceso de desinfección relacionado con el mismo, y aunque es una medida que se debe adoptar en todos los sistemas de suministro de agua potable, ya sea con carácter correctivo, o preventivo, puede deberse entre otras cosas a que toda agua pura o purificada en una estación de tratamiento puede tener un largo recorrido hasta su consumo. De igual manera, los depósitos pueden ocasionar su contaminación (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente División de Salud y Ambiente [CEPIS], 2002).

Como tratamiento final en el proceso de saneamiento, la desinfección métodos convencionales como el cloro, sin embargo, dentro de sus limitaciones es que, si existe materia orgánica, se formaran los compuestos organoclorados los cuales tienen grandes afecciones en la salud de los seres humanos (WHO, 2018). Otras metodologías como la ebullición, la radiación UV y en estos últimos años la ozonización efectiva con menos implicaciones de subproductos tóxicos.

Por otro lado, la especie oxidante, oxígeno molecular singulete ($^1\text{O}_2$), en sus inicios fue usada para el tratamiento fotodinámico para el tratamiento del cáncer, (Valkov et al., 2018), sin embargo, a la fecha se ha potenciado como bactericida gracias a sus efectos en bacterias y se han realizado investigaciones donde se ha podido establecer dicha capacidad (Jiménez, 2010).

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, a la fecha no se contaba con una recopilación bibliográfica que dé cuenta de aquellas variables significativas en este proceso de potabilización, por ello, esta investigación, se estableció esas condiciones requeridas para la apuesta de la tecnología, las variables analizadas fueron: pH, Longitud de Onda de la Radiación, Intensidad de la Lámpara, Tiempo de Exposición y Porcentaje de Efectividad del Tratamiento.

Además, se puede establecer que según los resultados mostrados es una técnica comparable y eficaz frente a las metodologías convencionales.

En esta investigación efectuó una búsqueda bibliográfica con la que se logró establecer la aplicación de la especie reactiva oxígeno molecular singulete ($^1\text{O}_2$) para la desinfección de aguas. Para ello, primero se realizó una compilación de documentación especializada, visitando motores de búsqueda y bases de datos tales como: Dialnet, ACS, Oxford Journals, Redalyc, Redalyc, Sage, Scielo, Scielo, ScienceDirect, Scopus, Springer Link, Taylorfrancis, y Google Académico. El criterio de selección de los artículos para el desarrollo de esta investigación se realizó bajo la rúbrica de revisión de esta propuesta, teniendo en cuenta aspectos relacionados con: efectividad/ eficiencia del desinfectante, costos de operación comparados con otras tecnologías, tiempo de proceso, espectro de acción entre otras.

Objetivos

Objetivo General

Realizar una revisión sistemática de la aplicación de la especie reactiva oxígeno molecular singulete ($^1\text{O}_2$) para la desinfección de aguas.

Objetivos Específicos

Recopilar información relacionada con la aplicación de la especie reactiva oxígeno molecular singulete ($^1\text{O}_2$) para la desinfección de aguas en bases de datos reconocidas.

Establecer los parámetros y condiciones más relevantes en el proceso de desinfección de aguas.

Comparar la eficiencia de la especie reactiva oxígeno molecular singulete ($^1\text{O}_2$) para la desinfección de aguas con relación a otros métodos de desinfección.

Marco conceptual

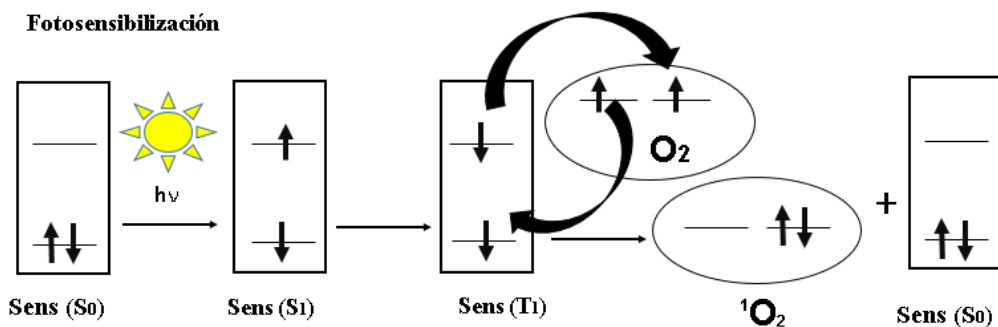
Fotosensibilización

La fotosensibilización, que sucede cuando se presenta la transferencia de energía de una molécula activada foto-químicamente a un aceptor para formar especies reactivas, para lo cual es utilizado como especie reactiva el oxígeno molecular singlete ($^1\text{O}_2$), que es oxígeno en estado electrónico activado por radiación lumínica.

De manera natural, el oxígeno singlete es producido por los neutrófilos y macrófagos con el fin de eliminar microorganismos, sin embargo, éstos producen enzimas como superóxido dismutasas, catalasas y peroxidasas, con el fin de defenderse de especies radicalarias y oxígeno reducido, no obstante, estas enzimas no presentan efectividad contra el oxígeno singlete, las bacterias Gram-positivas son más sensibles al oxígeno singlete que las bacterias Gram-negativas, además las especies de virus envueltos son inactivadas por el oxígeno singlete con mayor facilidad en comparación con los virus no envueltos (Valkov et al., 2018). Por otro lado, la especie oxidante, oxígeno molecular singlete, en sus inicios fue usada para el tratamiento fotodinámico para el tratamiento del cáncer, (Valkov et al., 2018), sin embargo, a la fecha se ha potenciado como bactericida gracias a sus efectos en bacterias y se han realizado investigaciones donde se ha podido establecer dicha capacidad (Jiménez, 2010).

Figuras 1

Mecanismo del proceso de fotosensibilización

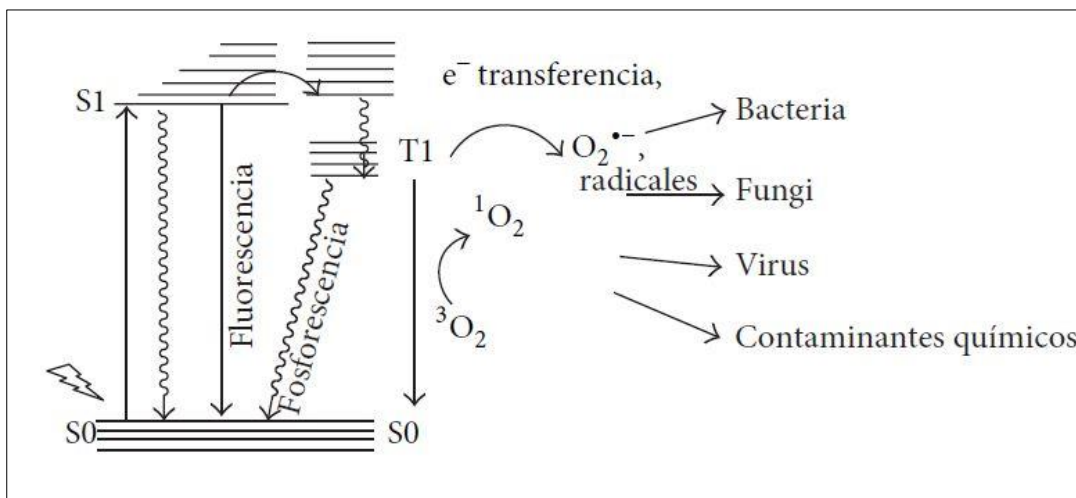


Nota: En esta figura se muestra el proceso de fotosensibilización. Fuente: Elaboración propia

El Mecanismo de fotosensibilización (Figura 1), implica especialmente tres componentes, que son, el fotosensibilizador, la luz y el oxígeno, y ocurre por intermedio de la excitación de moléculas de un determinado colorante, denominado sensibilizador, lograda a través de la absorción de luz con una longitud adecuada, para tal fin, dando lugar a especies reactivas de oxígeno (ROS). En este caso se presenta la transferencia de energía de una molécula activada foto-químicamente a un aceptor para formar especies reactivas, para lo cual es utilizado como especie reactiva el oxígeno molecular singlete, que es un estado electrónico excitado de la molécula de oxígeno (O_2) y se representa como ($^1\text{O}_2$), y ha sido activado por radiación lumínica. Los ROS son citotóxicos por naturaleza, lo que nos permite emplear este fenómeno para como destruir microorganismos no deseados bacterias, hongos y virus (Figura 2). Estos ROS también pueden oxidar contaminantes orgánicos en CO_2 y agua (Thandu et al., 2015).

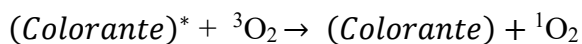
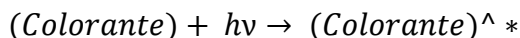
Figuras 2

Destrucción de microorganismos no deseados bacterias, hongos y virus



Nota En esta figura se muestra el proceso de Destrucción de microorganismos no deseados bacterias, hongos y virus. Fuente: Thandu et al., 2015

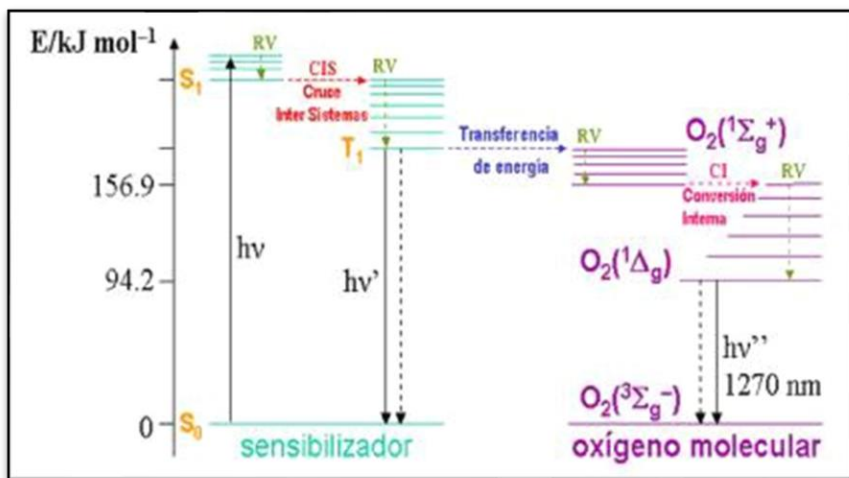
Reacción general de un proceso de sensibilización



Desde un punto de vista molecular el mecanismo de fotosensibilización da lugar a partir del estado excitado triplete del sensibilizador, que es desactivado mediante colisión con una molécula de oxígeno (O₂) por intermedio de transferencia energética por intercambio electrónico. (Figura 2). Esta colisión produce una molécula de oxígeno singlete, con la consiguiente recuperación del sensibilizador en su estado fundamental. La determinación del balance energético del proceso de sensibilización se lleva a cabo mediante su diagrama de estados energéticos implicados en el proceso o diagrama de Jablonski (Figura 3) (García-Fresnadillo, 2010)

Figuras 3

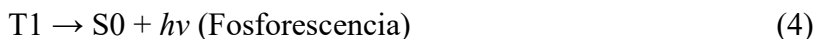
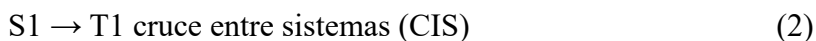
Diagrama de Jablonski para el proceso de sensibilización del oxígeno singlete



Nota: En esta figura se muestra el Diagrama de Jablonski para el proceso de sensibilización del oxígeno singlete Fuente: García-Fresnadillo, 2010

Los colorantes orgánicos y los fotosensibilizadores generalmente se absorben en el rango visible (400-800 nm), y la excitación se consigue mediante la transición de un fotón ($h\nu$) desde el estado fundamental (S_0) al estado excitado singlete (S_1)(1), el exceso de energía vibrorrotacional del mismo se disipa a través de un proceso de relajación vibracional (RV), (S_1) puede someterse a un cruce entre sistemas (CIS) para dar el estado de triplete excitado (T_1) (2), que requiere la inversión del espín del electrón excitado, por otra parte, la relajación de (S_1) y (T_1) al estado fundamental da como resultado fluorescencia y fosforescencia, respectivamente (3), (4). De esta manera, luego de producirse la relajación vibracional se logra el nivel triplete excitado (T_1) más bajo del sensibilizador, desde el cual puede experimentar una transición sin radiación al transferir su energía a otra molécula si hay moléculas de oxígeno presentes en el medio por intercambio electrónico. Este proceso compite con la relajación del sensibilizador excitado al estado fundamental (proceso no radiante) y con la emisión de un fotón de luminiscencia $h\nu''$ (proceso radiante) (García-Fresnadillo, 2010). En presencia de oxígeno, el

fotosensibilizador transfiere fácilmente energía al oxígeno en estado fundamental triplete produciendo oxígeno singlete $^1\text{O}_2$ (5) (Thandu et al., 2015).



Una vez ocurrida la transferencia de energía se alcanza rápidamente el estado excitado singlete $1\Delta_g$ del dioxígeno, el cual puede reaccionar durante su tiempo de vida con alguna molécula reactiva presente en el medio, o bien desactivarse al estado fundamental del dioxígeno a través de un proceso radiante (emisión de un fotón de fosforescencia a 1270 nm) o no radiante.

Fotosensibilizadores y Tipos de Fotosensibilizadores

Los fotosensibilizadores (FS) puede ser de carácter inorgánico, orgánicos tales como compuestos coloreados y compuestos coordinados que se excitan bajo la iluminación con luz visible y pueden transferir su energía de excitación o intercambiar un electrón con otras sustancias, tal es el caso de la especie reactiva oxígeno molecular singulete ($^1\text{O}_2$), que es oxígeno en estado electrónico activado por radiación lumínica.

Una sustancia tiene un comportamiento de agente fotosensibilizador (FS) cuando al ser irradiada por luz ultravioleta (UV) o visible, sus moléculas pasan a un estado electrónicamente excitado, estas moléculas excitadas, por sí misma o por transferencia de energía, electrones o átomos de H a otro sustrato, generan especies altamente reactivas (Comini & Montoya, 2016). Los fotosensibilizadores que se utilizan con mayor regularidad para la generación de oxígeno

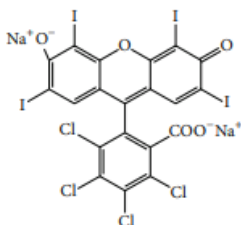
singlete son la fenalenona ($\phi\Delta = 1$), el rosa de bengala ($\phi\Delta = 0.75$), el azul de metileno ($\phi\Delta = 0.5$), los complejos de rutenio (II) con ligandos poliazaheterocíclicos quelatantes del tipo 2,2'-bipiridina o 1,10- fenantrolina y sus derivados ($\phi\Delta = 0.2-1$) así como los derivados de porfirinas y ftalocianinas, y sus complejos metálicos (García Fresnadillo, 2010). Fotosensibilizadores (FS) como hidrocarburos aromáticos, cetonas aromáticas y tiones, quinonas, cumarinas, fluoresceínas, metales de transición complejos y heterocíclicos, Porfirinas y las ftalocianinas, otros materiales que se han investigado para la producción de oxígeno singlete, como colorantes y fármacos. (Wilkinson et al., 1993)

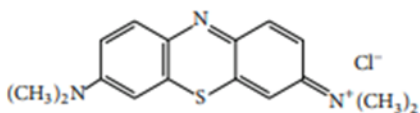
Entre los colorantes más usados como Fotosensibilizadores se destacan el rosa de bengala, el azul de metileno o derivados de porfirinas y ftalocianinas, además de algunos compuestos de coordinación del rutenio (II) con ligandos poliazaheterocíclicos quelatantes que absorben luz visible y son capaces de generar $^1\text{O}_2$, por medio de transferencia de energía, con buenos rendimientos cuánticos. También podemos destacar el uso de algunos semiconductores como TiO_2 , Fe_2O_3 , WO_3 , ZnO y CdSe que a su vez requieren energía luminosa en el rango de UV-A (nm) para llevar a cabo la actividad fotoquímica, mostrando gran comportamiento al respecto. (Wilkinson et al., 1993)

Compuestos Aromáticos

Figuras 4

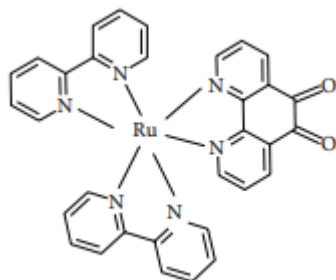
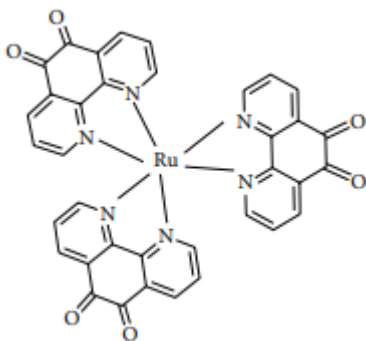
Rosa de Bengala (RB)



Figuras 5*Azul de Metileno (MB)*

Nota: Se muestran las figuras de compuestos aromáticos utilizados como fotosensibilizadores.

Fuente: Botija González, 2002

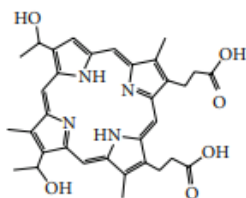
Compuestos Complejos de Rutenio**Figuras 6***Bis (2,2 -Bipiridina) (1,10-Fenantrolina-5,6-diona) Rutenio (II) (Complejo 1)***Figuras 7***Tris (1,10-phenanthroline-5,6-dione) Rutenio (II) (Complejo 2)*

Nota: Se muestran las figuras de compuestos complejos de Rutenio utilizados como fotosensibilizadores. Fuente: Van Der Westhuizen et al., 2019

Porfirinas

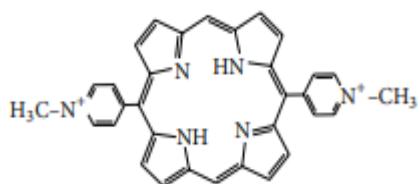
Figuras 8

Hematoporfirina (Hp)



Figuras 9

5,15-Di(N-metil-4-Piridinio) Porfirina (DMPyP)



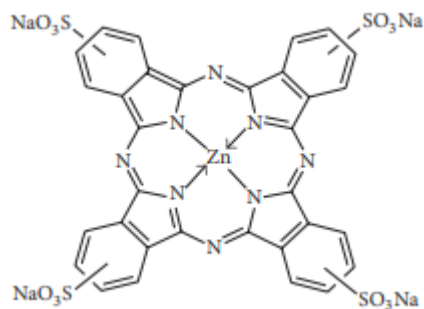
Nota: Se muestran las figuras de compuestos Porfirinas utilizados como fotosensibilizadores.

Fuente: Pujol et al., 2011

Talocianinas

Figuras 10

Zinc (II) Talocianina Acido tetrasulfónico Sal tetrasodio (ZnPcS)



Nota: Se muestra las figura de compuestos talocianinas utilizados como fotosensibilizadores.

Fuente: Bonnett et al., 2006

Propiedades de los Fotosensibilizadores

Existen varios grupos de moléculas que absorben UV/vis y han demostrado capacidad para generar oxígeno singlete. Los fotosensibilizadores deben presentar las siguientes propiedades:

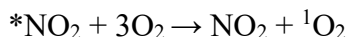
Alto coeficiente de absorción en la región espectral de la fuente luminosa de excitación. Un estado triplete de energía apropiada ($E_T \geq 95$ kJ/mol) para permitir una transferencia eficiente de energía al oxígeno en estado básico. Alto rendimiento cuántico del estado triplete ($\phi_T > 0,4$) y tiempos de vida largos del estado triplete ($\tau_T > 1$ ms), ya que la eficiencia del fotosensibilizador depende de las propiedades fotofísicas de su estado triplete de excitación más bajo, también debe presentar alta fotoestabilidad (DeRosa & Crutchley, 2002).

Generación de Oxígeno Molecular Singlete en el Ambiente

El estado energético de una molécula es singlete cuando sus dos electrones más externos se encuentran apareados y tienen números cuánticos de espín opuestos o antiparalelos, mientras que, es triplete cuando sus dos electrones más externos se encuentran desapareados o paralelos y tienen números cuánticos de espín iguales. (García Fresnadillo, 2010). El oxígeno singlete es un estado electrónico activado del estado básico del oxígeno molecular, cuya forma básica es un triplete 3O_2 .

El método frecuente por el que se produce el 1O_2 es fotoquímico; la luz absorbida por un compuesto intermedio, o fotosensibilizador, lo convierte en un estado triplete excitado, que en casos favorables es capaz de transferir energía de forma eficiente al oxígeno en estado básico, produciendo la forma singlete (Larson & Marley, 1999). A nivel troposférico las principales fuentes de oxígeno singlete son las transferencias de energía de otras moléculas electrónicamente

excitadas al oxígeno en estado básico. Por ejemplo, el NO₂ excitado es capaz de provocar esta conversión:



En la atmósfera superior, debido a que el ozono se encuentra en concentraciones mucho más altas por encima de la troposfera, y su fotólisis es una reacción muy importante en la estratosfera, cabría esperar, un flujo significativo de ¹O₂, y debido a la menor densidad de las moléculas por encima de la troposfera, ¹O₂ tiene un tiempo de vida mucho mayor a estas altitudes (Larson & Marley, 1999). En las aguas superficiales naturales, se forma con una eficacia aproximada del 1% a partir de materiales húmicos disueltos, pero su desactivación por las moléculas de agua es tan rápida que muy pocas reacciones químicas pueden competir, y existe consenso en que no se debe esperar que el ¹O₂ esté presente en altas concentraciones en una masa de agua natural (Larson & Marley, 1999).

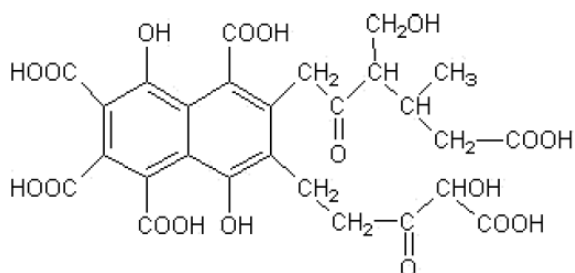
Por otra parte, la materia orgánica (MO) en sistemas acuáticos y sus reacciones fotoquímicas son reconocidas por afectar un número de procesos de importancia medioambiental, incluyendo, entre otras cosas, actúa como fuente de carbono y energía y afecta la retención, el transporte y la química de diversos componentes esenciales para los ecosistemas, y su importancia radica, además en el papel del MO como fotosensibilizador natural, que potencia la formación de especies reactivas del oxígeno (ROS), como radicales hidroxilos (OH•) y el oxígeno singlete (¹O₂) (Mostafa & Rosario-Ortíz, 2013).

Sustancias Húmicas

Según MacCarthy et al. (2015), el término sustancias húmicas se refiere a una mezcla heterogénea de materiales orgánicos naturales, definida desde el punto de vista operativo. Estas sustancias son extendidas en la naturaleza y surgen de la descomposición de residuos vegetales y

Figuras 12

Estructura de Ácido fúlvico.



Nota: La figura muestra la estructura del ácido fúlvico. Fuente: Adaptado de (Potosí Rodríguez, 2016)

En función de su origen, método de extracción y otros factores, la composición de las sustancias húmicas varía. Sin embargo, en términos generales, las similitudes entre las diversas sustancias húmicas son más evidentes que las diferencias entre ellas. Por supuesto, es esta similitud la que permite categorizar las sustancias húmicas en una clase. Debido a que estos materiales son mezclas complejas, sus propiedades medidas son todas propiedades medias. Las determinaciones elementales y de grupos funcionales son dos métodos populares para caracterizar sustancias húmicas (Sutton & Sposito, 2005).

Importancia Ambiental de las Sustancias Húmicas

En cuanto su importancia ambiental hay que decir que, Babcock y Singer (1979), sostienen que las sales de aluminio y hierro (III) pueden coagular los ácidos húmicos y fúlvicos, que juntos constituyen más del 80% del peso de toda la materia orgánica acuática natural. Los ácidos húmicos, también conocidos como fracciones alcalino-solubles e ácido-insolubles, tienen un peso molecular más alto y se coagulan más fácilmente que los ácidos fúlvicos, también según Babcock y Singer (1979), se ha demostrado en algunas investigaciones anteriores, que, el cloro reacciona con sustancias húmicas en aguas naturales para producir cloroformo. Estas sustancias

como se ha dicho antes son derivadas de la descomposición vegetal y son una parte significativa del contenido de carbono orgánico de las aguas naturales, por ello, Babcock y Singer (1979), sostienen que el agua potable contiene concentraciones potencialmente perjudiciales de cloroformo y otros trihalometanos, por lo que podría acarrear problemas tanto medioambientales, como para la salud humana.

Las sustancias húmicas son comunes en aguas naturales y son conocidas por su capacidad para afectar la calidad del agua. La importancia de los grupos carboxilo en las sustancias húmicas radica en su capacidad para disociarse y liberar iones de hidrógeno, lo que puede reducir el pH del agua. La acidez del agua puede afectar significativamente la vida acuática y la calidad del agua. Por ejemplo, un pH bajo puede dificultar la respiración de los organismos acuáticos y reducir la solubilidad de algunos nutrientes importantes. Igualmente, la acidez puede influir en la movilidad y solubilidad de los metales y otros contaminantes en el agua (Oliver et al., 1983), estos investigadores, realizaron un estudio que midió la cantidad de grupos carboxilo en sustancias húmicas extraídas de varias fuentes de agua natural en Canadá y los Estados Unidos, sus hallazgos demostraron que la cantidad de grupos carboxilo varía según el tipo de sustancia húmica y el entorno en el que se encuentra. Por ejemplo, se encontró que las sustancias húmicas en los humedales contenían un 10% menos de grupos carboxilo que las sustancias húmicas en otros entornos. Los resultados de este estudio pueden ayudar a estimar los equilibrios iónicos de los ríos muy coloreados al proporcionar un método para estimar la contribución de las sustancias húmicas a la acidez del agua, también, esta información puede utilizarse para calcular el equilibrio iónico del agua, que es importante para comprender la composición química del agua y su posible impacto en el medio ambiente.

Por último, cuando se habla de cambio climático, el impacto inducido por el clima en las sustancias húmicas (HS) puede tener varias consecuencias para la calidad del agua dulce y las interacciones de contaminantes, según Lipczyńska-Kochany (2018), se espera que la producción de materia orgánica disuelta (DOM) aumente debido a la biodegradación mejorada de la materia orgánica del suelo (SOM), mientras que el escurrimiento y las inundaciones la exportarán desde el suelo a los ríos, lagos y aguas subterráneas. El crecimiento microbiano se estimulará y se puede mejorar la biodegradación de contaminantes en el agua. Sin embargo, también pueden existir efectos perjudiciales, como la disminución de la desinfección solar en lagos marrones y se prevé la desorción del suelo y los sedimentos causada por el cambio climático, así como la removilización de metales y contaminantes orgánicos. Por otra parte, es posible que el tratamiento in situ de agua superficial y agua subterránea se vea afectado y su calidad disminuya y que la producción de agua potable aumente sus costos.

Desinfección y Algunos Métodos de Desinfección

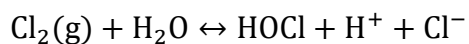
La desinfección consiste en la destrucción de manera selectiva de los microorganismos que causan enfermedades. No todos los microorganismos se destruyen durante el proceso. Existen tres grupos de microorganismos entéricos causantes de enfermedades de origen hídrico que son: las bacterias, los virus y los parásitos. Las enfermedades bacterianas típicas transmitidas por el agua son: que transmiten enfermedades tales como: salmonelosis (*Salmonella*), shigelosis (*Shigella*), colera (*Vibrio Cholerae*), amebiasis (*Entamoeba histolytica*), alteraciones gastrointestinales (*Aeromonas mesófilas*, *Helicobacter pylori*, *Campylobacter*); giardiasis (*Giardia lamblia*), criptosporidiosis (*Cryptosporidium*), esquistosomiasis (*Schistosoma*), desórdenes hepáticos (virus de hepatitis) (Apella & Araújo, 2005). Los métodos más empleados para llevar a cabo la desinfección son: agentes químicos; agentes físicos; medios mecánicos, y

radiación. La acción de los desinfectantes se ha pretendido explicar por cuatro mecanismos: daño a la pared celular; alteración de la permeabilidad de las células; alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma, e inhibición de la actividad enzimática (García Fresnadillo 2010).

Métodos de desinfección químicos con uso de Cloro

Cloración

El uso de cloro como desinfectante primario y secundario en el tratamiento del agua se realiza de manera general en la mayor parte del mundo. El método radica en adicionar cloro o algún subproducto como hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio al agua, lo que produce su reacción y la consiguiente formación de ácido hipocloroso (HOCl) e iones hipoclorito (OCl⁻), habitualmente llamados "cloro libre", y que son capaces de eliminar los microorganismos patógenos, el cloro es un fuerte desinfectante oxidante y su uso se recomienda cuando el agua no es turbia (<1 NTU) y el pH es inferior a 8,0 y su mayor ventaja consiste en que es capaz de durar mucho más tiempo en el agua como cloro residual luego de la dosificación, con lo que su actividad desinfectante se amplía dentro de los sistemas de distribución y almacenamiento (Pichel et al., 2019, p. 1029), aunque sea un método de desinfección de agua de gran eficacia, presenta desventajas como el sabor y el olor insatisfactorios, la incapacidad de eliminar quistes y huevos de protozoos (*Cryptosporidium* y *Giardia*) y los huevos de helmintos (*Drancunculus medinesis* y *Schistosoma*) (Pichel et al., 2019, p. 1029). Durante la cloración se producen las siguientes reacciones, cuando se adiciona cloro gaseoso al agua:



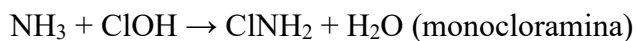
Si su dosificación se produce a través de una sal:



la cantidad relativa de las distintas especies cloradas oxidadas dependiendo del pH del agua. Así, se tiene que para $\text{pH} < 4$ el Cl_2 se encuentra en la forma molecular; para $4 < \text{pH} < 5.6$ predomina el ácido hipocloroso y para $\text{pH} > 9$ predomina el ión hipoclorito. No obstante, la literatura especializada establece que para valores de $\text{pH} < 7.5$ la especie predominante es el ácido hipocloroso el cual es alrededor de 80 a 100 veces más efectivo en la eliminación de bacterias indicadoras de contaminación fecal que el ion hipoclorito

Cloraminación

Según (Pichel et al., 2019, p. 1021), este tratamiento consiste en aplicar cloro y amoniaco de manera controlada, hasta que su reacción produzca monocloramina (NH_2Cl), siendo un método de desinfección menos eficaz que la cloración, siendo su uso más frecuente como desinfectante secundario durante la distribución que como desinfectante primario, y produce menos problemas de sabor y olor y no forma THM. Las reacciones de formación de las cloraminas son:



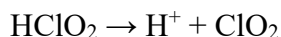
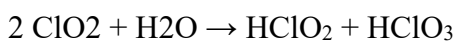
Dióxido de cloro

El dióxido de cloro (ClO_2) es un agente oxidante de mayor potencia comparado con el cloro y las cloraminas. Su acción desinfectante depende menos del pH que la del cloro y proporciona una actividad residual persistente, puesto que el dióxido de cloro es inestable, su aplicación requiere una síntesis en el sitio de ejecución mediante la acción del cloro o de un ácido sobre el cloro sódico, que luego se dosifican juntos en el agua, el tratamiento requiere una vigilancia, un seguimiento y un control constantes, y es mucho más caro que la cloración (Pichel

et al., 2019, p. 1029. Los principales subproductos que se forman en la desinfección son los cloritos y los cloratos, que favorecen al desarrollo de metahemoglobinemia y anemia hemolítica en los seres humanos, además este método, posee un bajo nivel de eficacia contra los ooquistes de *Cryptosporidium* y los problemas de sabor y olor, que limitan su uso como desinfectante secundario (Pichel et al., 2019, p. 1029). El dióxido de cloro se forma a partir de ácido clorhídrico y clorito sódico:



Y su capacidad de desinfección produce su descomposición, en presencia de materia orgánica, en ácido cloroso y clórico



Ozonización

Para (Pichel et al., 2019, p. 1029), el Ozono (O_3), generado in situ haciendo pasar oxígeno seco o aire a través de un sistema de electrodos de alta tensión, su uso como desinfectante de agua potable es tan generalizado como el del cloro, en términos de eficacia es mayor que la cloro y dióxido de cloro respectivamente. El tiempo de contacto requerido para lograr su efecto desinfectante, es menor comparado con el cloro y el dióxido de cloro, además que se necesitan concentraciones más bajas de dicho desinfectante. Es un desinfectante eficaz contra las esporas y los quistes, y es el único producto químico que puede inactivar la *Giardia* o el *Cryptosporidium*.

Procesos Avanzados de Oxidación

Proceso foto-Fenton

Según Giraldo (2004), una técnica de oxidación conocida como reactivo Fenton utiliza sales de hierro como catalizador en presencia de peróxido de hidrógeno para producir radicales hidroxilos, que son uno de los agentes oxidantes más potentes a pH ácidos (pH 3-5). Se ha descubierto recientemente que las reacciones, ultravioleta/visible aceleran las reacciones Fenton, lo que facilita la degradación de contaminantes orgánicos. Sin embargo, a pH más ácidos, este reactivo funciona mejor porque los hidróxidos de hierro precipitan y requieren un proceso adicional de coagulación, sedimentación o filtración para separarlos. Además, debido a la formación de complejos, la reactividad del hierro puede verse alterada por ciertos intermedios de reacción. La reacción es autocatalítica cuando el pH es inferior a 3. Las sales de hierro como el cloruro, el bromuro y el fluoruro se utilizan. El Fe^{2+} actúa como catalizador en la descomposición del H_2O_2 en las reacciones Fenton tradicionales, creando radicales OH.

Según Giraldo (2004), la regeneración fotoquímica de los iones Fe^{2+} puede ayudar a resolver el problema de la detención de la reacción. El reactivo Fenton es un método que utiliza sales de hierro como catalizador para producir radicales hidroxilos a un pH ácido. Es eficaz en la eliminación de contaminantes orgánicos. Aunque se requiere una coagulación o filtración adicional a un pH superior a 3, la reacción UV/visible acelera la reacción Fenton. Se utilizan varios tipos de sales de hierro y la reacción es autocatalítica a un pH menor de 3, la regeneración fotoquímica ayuda a resolver el problema de la detención de la reacción porque el Fe^{2+} actúa como catalizador en la descomposición del H_2O_2 .

Desinfección de Agua Potable Mediante Oxígeno Singlete

La técnica de utilizar oxígeno singlete en la desinfección de agua potable implica la generación controlada de oxígeno singlete en el agua para desinfectarla. Esto se puede lograr mediante la activación de compuestos sensibilizadores específicos por la luz solar o fuentes de luz artificial, lo que convierte el oxígeno molecular en oxígeno singlete altamente reactivo, en donde se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: selección de compuestos sensibilizadores adecuados, diseño del sistema de generación de oxígeno singlete, monitoreo y control de la generación de oxígeno singlete, y evaluación de la eficacia y seguridad (Ossola et al., 2021). El oxígeno singlete interactúa entonces con el ADN o las proteínas de los microorganismos y los daña, impidiendo su capacidad de reproducirse y sobrevivir, lo que conduce a la eliminación completa de las bacterias o microorganismos (Phiri et al., 2023).

Variables significativas en la desinfección por métodos de fotosensibilización

De acuerdo con las diferentes variables que pueden llegar a alcanzar mucha influencia con gran significancia en el proceso de desinfección por métodos de fotosensibilización, se resaltan las siguientes:

pH

La acidez de una solución acuosa se debe a la presencia de iones de hidrógeno (H^+), y es una característica importante de su teoría ácido-base. Por tanto, el grado de acidez se formula en términos de concentración de H^+ , se representa como $[H^+]$, y expresa la concentración molar de iones H^+ en una solución, los cuales están unidos a moléculas del disolvente, y es por ello, que los iones H^+ en el agua se escriben a menudo como iones hidronio, H_3O^+ , y la acidez se expresa como $[H_3O^+]$. A medida que aumenta $[H^+]$, la concentración efectiva de iones H^+ es

progresivamente menor de lo que cabría esperar, debido al aumento de la atracción interiónica en las concentraciones más altas (Kolb, 1979). Una definición más precisa del pH es:

$$\text{pH} = -\log\alpha\text{H}^+$$

donde αH^+ es la actividad del ion hidrógeno (o la concentración efectiva de H^+). La actividad H^+ se obtiene multiplicando la concentración de H^+ por un coeficiente de actividad adecuado. (Los coeficientes de actividad son factores de corrección basados en mediciones termodinámicas. Se aproximan a 1,00 para soluciones muy diluidas, pero se reducen a medida que aumenta la concentración). Los cálculos de pH más precisos requieren el uso de coeficientes de actividad, pero normalmente el pH se calcula a partir de la sencilla relación $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$, aunque tiende a perder validez a altas concentraciones (Kolb, 1979). En este sentido, el pH del agua bajo desinfección puede afectar la carga, el tamaño de partícula y la posición de las bandas de conducción y valencia del semiconductor utilizado en la fotodesinfección basada en semiconductores. Además, el pH también puede afectar la tasa de desinfección. El pH del agua puede afectar la carga y la solubilidad del fotosensibilizador, lo que a su vez puede afectar su capacidad para interactuar con las células bacterianas y generar ROS (Thandu et al., 2015).

Por otra parte, el pH influye en la efectividad de la fotosensibilización con rosa de bengala, y se encontró que la supervivencia de las bacterias disminuye tanto a pH por encima como por debajo de 7.0. Además, se observó un aumento significativo en la fotoinactivación a un pH de 9.6 en ausencia del sensibilizador, lo que sugiere que un pH alcalino puede ser tóxico por sí solo. En contraste, no se observaron cambios significativos en las tasas de fotodesinfección al variar el pH de 7.0 a 10.0 utilizando metileno azul (Thandu et al., 2015).

Intensidad de la radiación

Es la velocidad a la que los fotones son entregados al organismo objetivo (Acosta Castellanos et al., 2016), depende de varios factores, como la longitud de onda, la cantidad de luz emitida, la distancia entre el agua y la fuente de luz, el tiempo de exposición, y la calidad del agua. Además, la cantidad de bacterias presentes en el agua también puede afectar la intensidad de la radiación, necesaria para un tratamiento efectivo. En general, cuanto mayor sea la intensidad de la radiación, más efectivo será el tratamiento. Sin embargo, es importante asegurar que la intensidad no sea demasiado alta para evitar dañar la calidad del agua o generar subproductos no deseados. En este sentido, con las características del tubo de luz ultravioleta se puede determinar la dosificación de radiación (Acosta Castellanos et al., 2016):

$$I = \frac{\text{Potencia incidente (W)}}{\text{Área (m}^2\text{)}}$$

Dónde:

I, representa la intensidad (W/m²)

P, Potencia de la lámpara (W)

A, Área de contacto de la lámpara (m²)

La dosis, siendo una cantidad de energía, es, en el caso de la radiación UV, la irradiancia en [W.m⁻²] en el objetivo multiplicada por el tiempo en segundos (Meulemans, 1987)

Por tanto, la dosis se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Dosis} \left(\frac{\text{W} * \text{s}}{\text{m}^2} \right) = \text{Intensidad} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \times \text{tiempo de exposición (s)}$$

En todo caso, se tiene que, la intensidad de la luz UV depende de las propiedades de la lámpara, área superficial del tubo y potencia eléctrica, mientras que la dosis es directamente proporcional al tiempo de exposición, es decir, a mayor tiempo de exposición, mayor

dosificación y por ende mayor porcentaje de eliminación de microorganismos patógenos (Acosta Castellanos et al., 2016). Cuando los microorganismos se someten a la radiación UV, no se inactivan a la vez, sino que una fracción constante del número vivo actual muere en cada incremento de tiempo (Meulemans, 1987).

Tipo de lámpara

La exposición de sistemas microbiológicos a la luz UV dentro de la región germicida de 200 a 280 nm, provoca la inactivación de los microorganismos. La fuente más común de luz UV dentro de la región germicida es una lámpara de vapor de mercurio de baja presión que funciona con corriente alterna a una frecuencia de 50 Hz. A una temperatura de funcionamiento ambiente, aproximadamente el 90% de la luz se emite a una longitud de onda de 254 nm, que se aproxima a la longitud de onda pico de efecto necesaria para matar o destruir el ADN de las bacterias (Al-Shamma'a et al., 2001), sin embargo, también, se encuentra radiación de banda más ancha a partir de descargas de arco de alta corriente con mezclas de xenón y mercurio que emiten radiación que va de 200 nm a varias micras. Sin embargo, dado que muchos materiales absorben la radiación a longitudes de onda inferiores a unos 250 nm, es muy conveniente disponer de fuentes UV o UV profundas muy eficaces para estimular los procesos químicos (Boyd & Zhang, 1997). Por otra parte, en los últimos ha habido una progresiva investigación relacionada con la aplicación de las modernas lámparas de excímeros y exciplex (excilámparas) con fines de descontaminación. Estas fuentes de radiación UV y UV al vacío (VUV) sin mercurio se basan en la transición de dímeros excitados por gases raros, dímeros excitados por halógenos o complejos excitados por haluros de gases raros, y emiten radiación casi monocromática a longitudes de onda que van de 172 a 345 nm (Matafonova & Batoev, 2012). Las lámparas de mercurio de baja presión (LP), que generan principalmente luz UV monocromática a 254 nm, se utilizan

habitualmente para la desinfección UV. Como la luz UV a esta longitud de onda está cerca del máximo de absorción del ADN a 260 nm, una lámpara UV LP suele denominarse lámpara germicida. Las excilámparas de descarga de barrera dieléctrica, que se basan en la transición de dímeros excitados por gases raros, dímeros excitados por halógenos o complejos excitados por haluros de gases raros, son un tipo relativamente nuevo de lámpara UV con longitudes de onda de emisión que van de 170 a 350 nm (D. Wang et al., 2010).

Longitud de onda de la radiación

La acción germicida en la desinfección solar del agua potable se atribuye a las longitudes de onda que llegan a la superficie de la Tierra. Aunque la UVC se absorbe durante su paso por la atmósfera y puede despreciarse, la UVB no suele tenerse en cuenta cuando se estiman los aspectos físicos y microbiológicos del proceso. Esta estrategia puede ser cierta para la SODIS que tiene lugar en los vasos receptores que filtran la UVB, pero antes de su disminución debido a las limitaciones de la longitud del trayecto, la UVB afecta significativamente a una capa considerable de las masas de agua naturales expuestas, lo que conduce principalmente a las mutaciones y posiblemente a la apoptosis y/o a la muerte celular inminente (Giannakis, 2016). La irradiación continua sin ninguna interrupción permite la desinfección completa, pero una irradiación interrumpida reduce la actividad bactericida. Se entiende que los mecanismos de autodefensa de las bacterias les ayudan a recuperarse. La célula bacteriana genera la enzima superóxido dismutasa (SOD) como mecanismo de defensa para hacer frente a la cantidad desproporcionada de especies reactivas de oxígeno (ROS) en el interior de la célula y reduce el estrés oxidativo. En una reacción fotocatalítica, la intensidad de la irradiación es sin duda un parámetro importante. La superficie del catalizador, al ser irradiada, crea sitios activos para la producción de ROS, dando lugar al inicio del proceso de inactivación. Una mayor irradiación

hace que se origine una mayor obtención de ROS, pero además de la intensidad de la irradiación, la superficie del desinfectante también son un factor que influye en la tasa efectiva de producción de ROS (Ganguly, 2018). Pero es bien sabido que muchos microorganismos tienen la capacidad de reparar el daño inducido por la UV. Se han descrito dos mecanismos de reparación. Uno es independiente de la luz, denominado reparación oscura, y el otro es la fotorreactivación, un fenómeno por el cual las lesiones inducidas por la radiación UV en el ADN pueden repararse utilizando la energía de la luz UV cercana (310-480 nm) y la enzima fotoliasa, lo que puede influir en la eficacia de la desinfección UV en las horas siguientes al tratamiento (Guo et al., 2009), en otras palabras, muchos organismos tienen la capacidad de reparar los efectos dañinos de la luz ultravioleta cuando se exponen a longitudes de onda en el rango espectral cercano al ultravioleta o azul violeta (Lindenauer & Darby, 1994). La radiación de este rango de longitud de onda es capaz de atravesar las paredes celulares de las bacterias y es parcialmente absorbida por el ADN. Mediante este proceso, se forman dímeros de timina que impiden la replicación posterior de las cepas de ADN (Ha & Kang, 2018).

Tiempo de Exposición

El tiempo de exposición se refiere al tiempo que el agua debe estar en contacto con el oxígeno singlete para lograr la desinfección deseada. Este tiempo de exposición depende de la cantidad de microorganismos presentes en el agua y del nivel de desinfección requerido. En general, se recomienda un tiempo de exposición de al menos 15 minutos para lograr una desinfección eficaz. La extensión del tiempo de contacto del desinfectante depende de su concentración (Sommer et al., 1998). Sin embargo, este tiempo puede variar dependiendo de las características del agua y del proceso utilizado. La eficacia de la desinfección UV del agua depende de la dosis, que se define como el producto de la intensidad y el tiempo de exposición.

De la desinfección química del agua (cloro, dióxido de cloro y ozono) se sabe que un tiempo de contacto adecuado es esencial para garantizar una reducción suficiente de los patógenos microbianos transmisibles por el agua. En las aguas superficiales, lo que provoca una reducción de las concentraciones de microorganismos patógenos e indicadores. En ese caso funcionan tiempos de exposición muy largos con intensidades UV bajas que representan una dosis UV ampliamente prolongada (Sommer et al., 1998).

Eficiencia de la Fotodesinfección

La eficiencia de la fotodesinfección se refiere a la capacidad del proceso de desinfección con oxígeno singlete y fotosensibilización para eliminar microorganismos presentes en el agua potable. Esta eficiencia depende de varios factores, como la concentración y el tipo de fotosensibilizador utilizado, la intensidad y la duración de la exposición a la luz, y la presencia de otros compuestos o materias orgánicas que puedan interferir en el proceso factores (Lindenauer & Darby, 1994).

La eficiencia de la fotodesinfección se calcula comparando el número de microorganismos antes y después del tratamiento con luz ultravioleta. Para ello, se toma una muestra del agua, se cuenta el número de microorganismos presentes y se somete al agua a la luz ultravioleta. Luego se toma una nueva muestra del agua y se cuenta nuevamente el número de microorganismos presentes. La eficiencia de la fotodesinfección se calcula dividiendo el número de microorganismos eliminados por el número de microorganismos presentes inicialmente, y multiplicando por 100 para expresarlo en porcentaje (You et al., 2019). Durante el periodo de incubación, el sensibilizador interactúa con la membrana externa de la célula, penetra en ella y se localiza en el compartimento celular apropiado. Cabe destacar que la localización del

sensibilizador en el interior de las bacterias es importante para su destrucción fotodinámica.
(Kuznetsova et al., 2007).

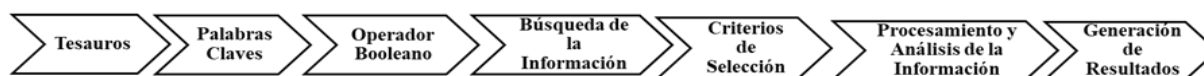
Metodología

Recopilación de la Información a través de las Bases de Datos

Para la revisión de las bases de datos, se trazó una ruta metodológica, a través de diferentes fases, tal y como podemos observar en la Figura 13. Inicialmente, se hizo la búsqueda bibliográfica, teniendo en cuenta el uso de tesauros, que permitió clasificar y direccionar las entradas en los sistemas de indexación y recuperación de la información en bases de datos (González 2012) (Molina, 2019). Para el establecimiento de los tesauros, se realizaron lecturas previas del tema que tener un conjunto de palabras relacionadas con la temática de estudio.

Figuras 13

Ruta Metodológica de la Investigación



Nota: Esta figura muestra los diferentes pasos llevados a cabo por la ruta metodológica de la investigación. Fuente: Elaboración propia

Luego, para la búsqueda de los documentos, se eligieron los metabuscadores Google Scholar y Scopus, al tiempo se hizo consulta en las bases de datos de Dialnet, ACS, Oxford Journals, Redalyc, Sage, Scielo, ScienceDirect, Scopus, Springer Link, Taylorfrancis, como medio de consulta e identificación de información relevante y relacionada con el tema. Luego de realizada las búsquedas, se aplicaron criterios de exclusión tales como: publicaciones indexadas, artículos científicos, tesis, revistas indexadas, libros y tesis con un rango de fecha de cinco años en el intervalo de tiempo comprendido entre 2015 y 2020; se preseleccionaron estudios disponibles en idioma inglés y español, estudios provenientes de fuentes primarias de información y por último la información con resultados relacionados con la temática.

Seguidamente, se hizo la construcción de una rúbrica de puntuación basado en la metodología PRISMA, cada artículo fue calificado, teniendo en cuenta nueve criterios de evaluación, a saber: título, DOI, resumen, introducción, objetivos, metodología, resultados, conclusiones y referencias, asignándoseles a cada ítem, los criterios de revisión: bajo (0.5), medio (1.0) y alto (1.5), tal y como se evidencia en la tabla 3. Por último, los artículos mejor valorados, se almacenaron en el gestor bibliográfico Mendeley y de esta manera se construyó la base de datos usada en esta investigación.

Tabla 3

Rubrica de evaluación basado en metodología PRISMA

Criterios de revisión	Bajo	Medio	Alto
Calificación	0.5	1.5	1.5
Título	Se identifica el artículo como una revisión sistemática	Se identifica el artículo de manera parcial como una revisión sistemática.	No se identifica el artículo de manera parcial como una revisión sistemática.
DOI	El artículo no posee Digital Object Identifier System,	----	El artículo posee Digital Object Identifier System,
Resumen	No hay una forma estructurada de al menos 250 palabras.	Posee una forma semiestructurada de menos de 250 palabras.	Posee una forma estructurada, de 250 palabras
Introducción	No se evidencia un soporte teórico claro.	Se tiene un poco de soporte y además la justificación no es categórica.	Se evidencia un soporte teórico claro, que respalda la investigación
Objetivos	No describe de forma explícita la(s) pregunta(s) de investigación.	Se describe de forma impreciso la(s) pregunta(s) de investigación.	Se describe de forma explícita la(s) pregunta(s) de investigación.
Metodología	No existe un diseño experimental planeado.	Existen algunos aspectos que dan cuenta de un diseño experimental confuso.	Existe un diseño experimental planeado, y/o protocolo de desarrollo experimental.
Resultados	No se evidencian claramente resultados.	Aunque se evidencian no se reportan replicados, no hay forma de certificar una confiabilidad estadística,	Se reportan replicas que permiten dar una confiabilidad estadística, facilitan respuesta a la metodología planteada.
Conclusiones	No facilitan una interpretación general de los resultados en el contexto de otra evidencia e	Suministran alguna(s) interpretación(es) general(es) de los resultados en el contexto de otra evidencia	Proporciona una interpretación general de los resultados en el contexto de otra evidencia implicaciones para futuras investigaciones.

		implicaciones para futuras investigaciones.	
Referencias	No tiene referencias actualizadas	Dispone de algunas referencias actualizadas	Posee referencias dentro del rango de estudios proyectados dentro de los objetivos de investigación.

Nota: Se muestra los criterios de evaluación tenidos en cuenta en la Rúbrica de evaluación

basado en metodología PRISMA. Fuente: Elaboración propia

Análisis de parámetros significativos en la desinfección

Finalmente, los artículos escogidos con mejores puntuaciones por la rigurosidad y pertinencia de la información, se analizaron las variables: pH, intensidad de la radiación tipo de lámpara, longitud de onda de la radiación, tiempo de exposición. Adicionalmente, se analizó la variable respuesta se denomina porcentaje de efectividad del tratamiento.

Con estos valores numéricos obtenidos de la literatura consultada, se construyeron a través del software R, los gráficos Boxplot e Histogramas, el cual permite visibilizar los promedios y desviaciones de los datos obtenidos, lo cual permitirá establecer una tendencia frente a las condiciones de operación. Finalmente, al analizar la efectividad, se compararon con otros métodos para conocer la competitividad de la metodología frente a los métodos tradicionales.

Resultados y Análisis de Resultados

Resultados del Análisis Bibliométrico

Como se definió en la ruta metodológica, las palabras claves derivan de la lectura especializada del tema, para se eligieron los términos en inglés: Photosensitizer, Solar disinfection, Drinking water, Advanced oxidation, Singlet oxygen. Luego, se eligió el operador booleano “AND”, para un mayor fortalecimiento de la búsqueda, con la finalidad de conectar de forma lógica conceptos y así poder ampliar, limitar o definir la búsqueda de manera más eficiente, de esta manera se obtuvieron las siguientes combinaciones de palabras:

“Photosensitizer” AND “Solar disinfection”, “Photosensitizer” AND “Drinking water”, “Photosensitizer” AND “Advanced oxidation”, “Solar disinfection” AND “Drinking water”, “Solar disinfection” AND “Singlet oxygen”, “Solar disinfection” AND “Advanced oxidation”, “Drinking water” AND “Singlet oxygen”, “Singlet oxygen” AND “Advanced oxidation”, con lo que se pudo construir la ecuación bibliométrica, descrita más adelante, teniendo en cuenta que la bibliometría puede ofrecer un componente sobre la toma de decisiones en la evaluación de la literatura que se va a escoger (Dávila, 2009).

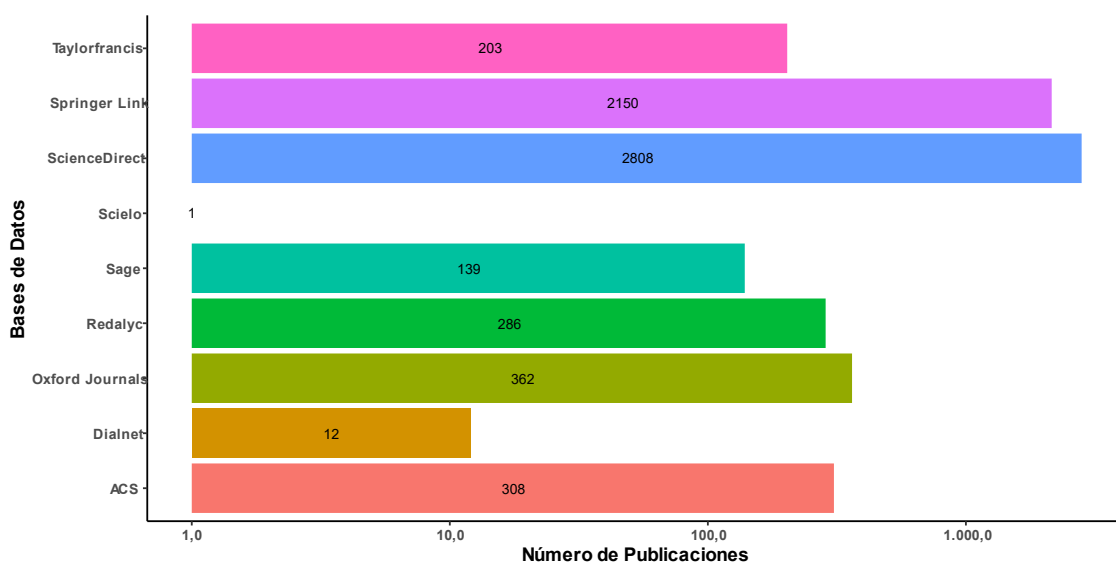
De los resultados obtenidos, en la Figura 14, se evidencia el comportamiento de hallazgos frente a las bases de datos seleccionadas, se evidencia que la base con más resultados fue Science Direct y el de menor resultado fue Scielo, la razón del porqué de estos resultados es que Science Direct es una base de datos especializada con referente a las ciencias, por ello, la razón de los resultados encontrados; en el caso de Scielo, por ser una base más de carácter multidisciplinar y en español, disminuye estos resultados.

Según los hallazgos en los 6269 encontrados mediante búsqueda en las bases de datos se halló que el 44.79 % (2808) de los artículos fueron encontrados en la base datos de Scence

Direct, el 34.30 % (2150) en la base de datos de Springer Link, mientras que el 5.77 % (362) y 4.91 % (308) de los mismos se hallaron en las bases de datos de Oxford Journals y ACS, respectivamente, también hay que mencionar que el menor porcentaje de artículos hallados correspondió a las bases de datos de Dialnet con 0.19 % y Scielo con 0.02 % de las búsquedas, lo que podría significar el interés de dichas bases de datos con relación al tema de búsqueda, así como también debido a su naturaleza interdisciplinaria de sus publicaciones, como lo evidenciamos en la Figura 14.

Figuras 14

Publicaciones halladas con relación a las bases de datos consultadas



Nota: En esta figura se muestran las diferentes publicaciones halladas con relación a las bases de datos consultadas. Fuente: Autores

De manera preliminar, se hizo una consulta tanto en bases de datos como en buscadores, con el ánimo de establecer el análisis de las variables: pH, intensidad de la radiación tipo de lámpara, longitud de onda de la radiación, tiempo de exposición. En consecuencia, se llevó a cabo la composición de la ecuación de búsqueda, o bibliométrica, con la combinación de las

palabras claves, para perfeccionar los resultados orientados hacia una mejor indagación, para el caso en particular se utilizó la combinación de palabras claves, “*Drinking water*” AND “*Singlet oxygen*”, que con 1163, artículos encontrados, y que representaron el 18.55% de los artículos hallados, cuya mayoría fueron incluidos, llevando a cabo la selección de los mismos, como vemos en las Figuras 15 y 16. De esta manera pudo establecerse que la ecuación bibliométrica más acorde a la investigación fue la siguiente:

$$AR^1O_2SDA = Dk + W \text{ and } Si + Ox$$

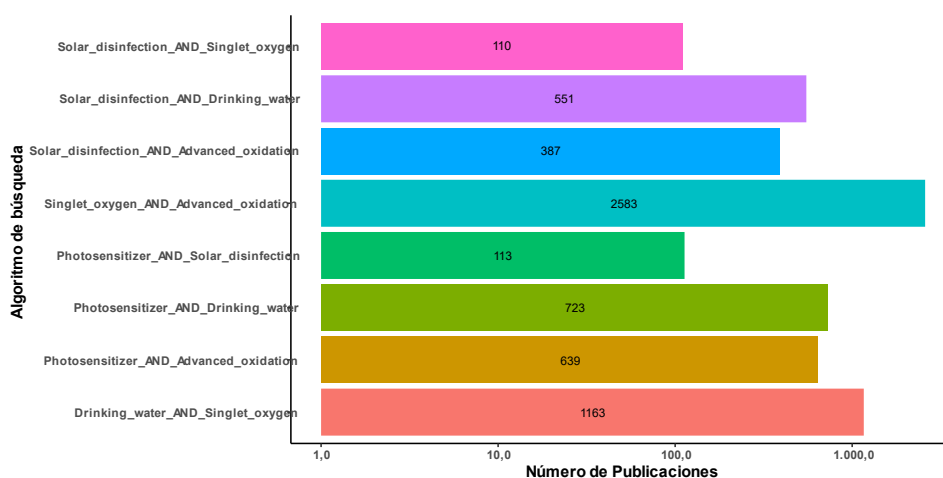
En la cual,

AR^1O_2SDA = Aplicación de la Especie Reactiva Oxígeno Molecular Singlete (1O_2) para la Desinfección de Aguas

Dk= Drinking; W= Water; Si= Singlet; Ox= Oxygen

Figuras 15

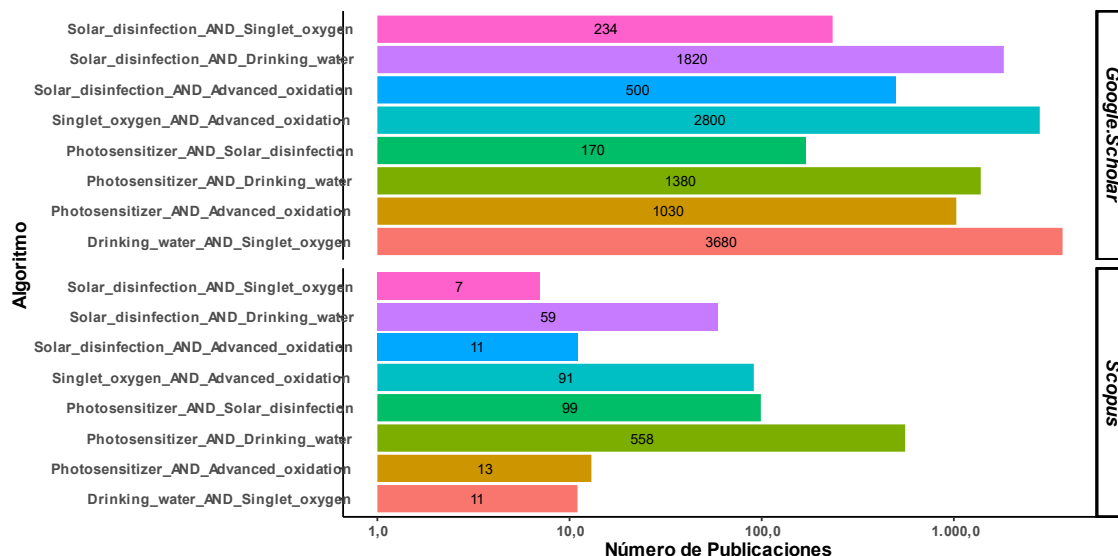
Publicaciones encontradas con algoritmo de búsqueda



Nota: En esta figura se muestran las publicaciones encontradas mediante el uso del algoritmo de búsqueda. Fuente: Autores

Figuras 16

Publicaciones para algoritmo de búsqueda en motores de búsqueda



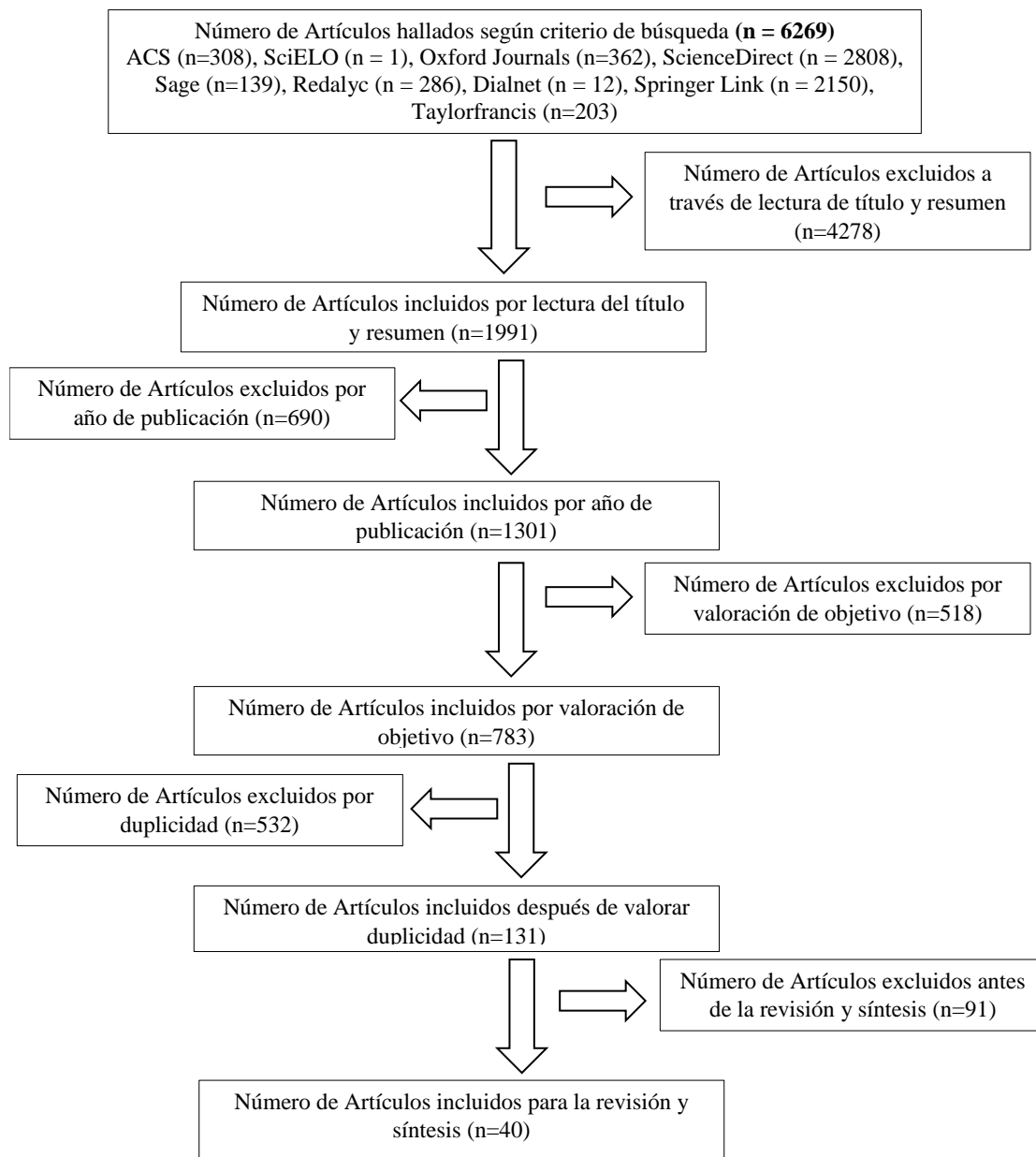
Nota: En esta figura se muestran las publicaciones para el algoritmo de búsqueda utilizado en motores de búsqueda. Fuente: Autores

Selección de Artículos

El uso de la rúbrica de evaluación consignados en la tabla 3, hizo posible que la información suministrada en los artículos hallados en la revisión bibliográfica, fuese refinada y seleccionada, teniendo en cuenta aquellos artículos cuya calidad cumpliera los modelos adecuados, dados según la aplicación de la rúbrica de puntuación, tal como lo se puede observar en la Figura 17, de esta manera se esquematiza la depuración llevada a cabo para hacer una clasificación completa de la información encontrada mediante la búsqueda. Se puede observar, el hallazgo en las bases de datos consultadas de 6249 publicaciones, y luego de la correspondiente depuración a través de algunos pasos o fases los resultados finales se lograron obtener 40 de artículos para ser incluidos en la revisión y síntesis, teniendo en cuenta que los artículos descartados, no cumplían con el objetivo de la investigación.

Figuras 17

Esquema de Selección de artículos



Nota: Esta figura muestra el esquema de selección de artículos utilizados en la revisión

sistemática. Fuente: Autores

Análisis de Variables en el Proceso de Desinfección por Fotosensibilización

pH

El pH de la solución puede afectar a la eficacia de la fotosensibilización al influir en la estabilidad del fotosensibilizador y en la producción de ROS (Zheng et al., 2018) y, por tanto, la eficacia de la desinfección con oxígeno singlete. De manera general haciendo el análisis de pH se evidencia que la fotosensibilización es un proceso en el que una sustancia química, denominada fotosensibilizador, es excitada por la luz y, a continuación, produce especies reactivas del oxígeno (ROS) que pueden dañar o eliminar las células (Sultanbawa et al., 2020). Para Chong et al. (2010), en el sistema fotocatalítico heterogéneo del agua, el pH es uno de los parámetros operativos más importantes que afectan a la carga de las partículas del catalizador, al tamaño de los agregados del catalizador y a las posiciones de las bandas de conductancia y valencia. En el caso de TiO₂ por ejemplo, se sabe que cualquier variación en el pH operativo afecta al punto isoeléctrico o a la carga superficial del fotocatalizador utilizado. Un aumento de la densidad de TiOH²⁺ (a pH bajo) puede formar un enlace electrostático con las bacterias de las superficies cargadas negativamente, dando lugar a un aumento de la tasa de foto-desinfección. Melián et al. (2000), no encontraron diferencias consistentes entre la fotocatálisis con TiO₂ y la irradiación solar directa o con luz de lámpara UV a pH natural de la muestra (7,8). Sin embargo, a pH 5, la presencia de TiO₂ aumentó la tasa de inactivación relativa en comparación con la ausencia del catalizador, además afirman que el efecto bactericida del TiO₂ es mayor a pH 5, lo que produce una mayor reducción del número de UFC cuando se combina con luz UV. En cuanto al sistema Vis/RB, la inactivación de *Escherichia coli* fue mayor a pH 5,7 que a pH 7,1 y 8,2, mientras que la inactivación de MS2 no varió con el pH. El cambio de pH puede facilitar la penetración de RB u oxígeno singlete en las células, pero la generación de oxígeno singlete no dependía del pH.

Estos resultados son similares a un estudio anterior que mostraba una mayor inactivación de *Escherichia coli* a pH 4,5 que a pH 7,0, sin cambios en la generación de oxígeno singlete (Kim et al., 2019).

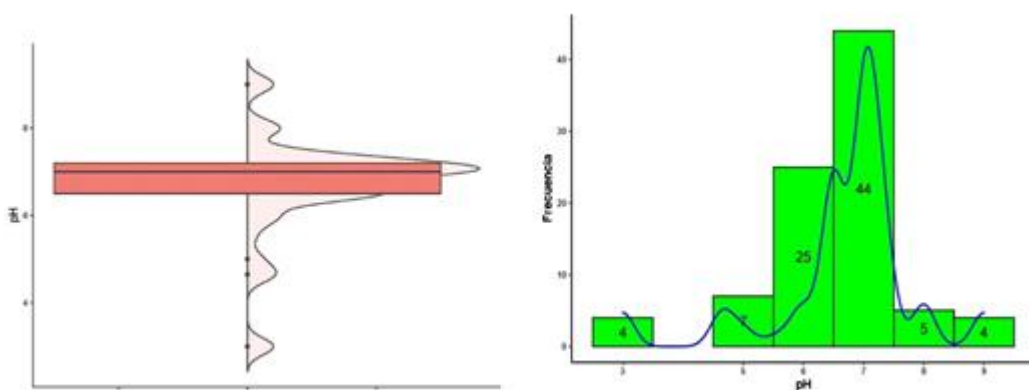
Por otro lado, según, Curtis et al. (1992), el pH tiene un efecto significativo en la capacidad de la luz solar para dañar los coliformes fecales en el agua de las lagunas de estabilización. Los valores más altos de pH causan un daño más rápido a las bacterias y la inactivación de los coliformes es más eficaz a pH más altos. La luz con longitudes de onda >425 nm puede dañar las bacterias en presencia del sensibilizador, y esto sugiere que el pH juega un papel importante en el proceso de fotosensibilización. Valores más altos de pH pueden aumentar la eficacia de este proceso en la inactivación de microorganismos. Es importante mencionar que, el reactivo Fenton es una técnica de oxidación que utiliza sales de hierro y peróxido de hidrógeno para producir radicales hidroxilos, que son uno de los agentes oxidantes más potentes a pH ácidos. La reacción se acelera con la reacción UV / visible, lo que favorece la degradación de contaminantes orgánicos. Este reactivo es más efectivo a pH ácido, ya que los hidróxidos de hierro precipitan a pH mayor de 3 y se necesitan procesos adicionales para separarlos. Se utilizan diferentes sales de hierro y el Fe^{2+} actúa como catalizador en las reacciones Fenton tradicionales, mientras que la regeneración fotoquímica de los iones Fe^{2+} puede ayudar a solucionar el problema de detención de la reacción (Garcés, 2004).

Por otro lado, a valores de pH casi neutros, tanto las especies de Fe (III) como de Fe (II) están presentes en la solución, lo que puede conducir a una mayor producción de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$), una especie reactiva clave responsable de la inactivación bacteriana. Además, el mantenimiento de un intervalo de pH casi neutro garantiza que no se produzcan cambios en

los mecanismos catalíticos que puedan afectar a la eficacia de la inactivación bacteriana por el proceso foto-Fenton (Mosteo et al., 2020).

Figuras 18

Medidas de pH



Nota: En esta figura se dan a conocer la gráfica de las distintas medidas de pH, publicados en los artículos consultados. Fuente: Autores

La figura 18 muestra las medidas de pH reportadas, Deng et al. (2017), investigaron el intervalo de pH de 5 a 9 para determinar los efectos del pH en la eficacia antibacteriana del g-C₃N₄-AgBr. Los resultados mostraron que la eficacia antibacteriana del g-C₃N₄-AgBr era similar en condiciones neutras y ligeramente ácidas (pH 5-7), mientras que las actividades de desinfección aumentaban en condiciones alcalinas (pH 8-9), en este sentido, las actividades de desinfección del g-C₃N₄-AgBr aumentaron en condiciones alcalinas (pH 8-9). Según ellos, la generación de •OH- ligado a la superficie se vería favorecida térmicamente en condiciones alcalinas con una concentración relativamente alta de •OH. Así, la cantidad de •OH- ligado a la superficie aumentaría con el incremento del pH, lo que podría contribuir a mejorar los efectos de inactivación celular a pH más altos. El pH de la solución no indujo el cambio de los potenciales zeta del g-C₃N₄-AgBr, mientras que los potenciales zeta de *Escherichia coli* se hicieron

ligeramente más negativos a pH alto. Teóricamente, sería más difícil que las bacterias interaccionaran directamente (entraran en contacto) con el g-C₃N₄-AgBr a pH alto. Por su parte, Zhang et al. (2018), en el caso de la inactivación vírica por g-C₃N₄/EP-520, la disminución del pH dio lugar a una inactivación vírica más rápida y eficaz. Se observó una inactivación de aproximadamente 5 log en 180 minutos de irradiación con luz visible a pH 9, mientras que a pH 5 se consiguió una inactivación de 8 log durante el mismo tiempo de reacción. A diferencia de la inactivación bacteriana, en la que la disminución del pH redujo la eficacia de la inactivación, la inactivación viral por g-C₃N₄/EP-520 es más favorable en condiciones ácidas. Mientras que, Kohantorabi et al. (2019), hacen referencia que el éxito del proceso foto-Fenton a pH casi natural se basa en la reducción mediada por el sol de especies de complejos acuosos férricos, que son fotoactivos. Su reducción a Fe²⁺ aumenta la eficacia de la reacción de Fenton. Esto sugiere que el proceso foto-Fenton puede ser eficaz a niveles de pH naturales o cercanos a ellos.

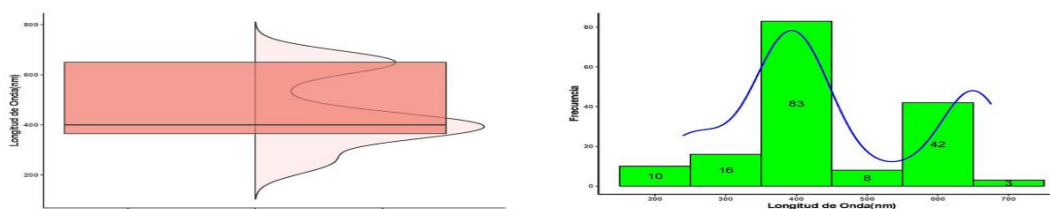
Longitud de onda

Cuando la luz atraviesa una solución de un compuesto, algunas longitudes de onda se transmiten, otras se dispersan y las restantes se absorben en proporción a la concentración de la sustancia absorbente. El número de fotones absorbidos a diferentes longitudes de onda constituye un espectro de absorción, que proporciona mucha información sobre la configuración molecular, la transición electrónica y los niveles de energía (Jemli et al., 2002). Según Wigginton et al. (2010), señala que la luz UVB solar se extiende sólo a través de la capa superior de la zona fótica, debido a la rápida atenuación por la materia orgánica natural. Los rayos UVA y la luz visible penetran más en la zona fótica e inician reacciones fotoquímicas indirectas para formar ROS. Así, en aguas naturales muy coloreadas, el daño indirecto desempeña el papel dominante en la inactivación fotoquímica de patógenos.

Los distintos microorganismos presentan diferentes sensibilidades a las distintas longitudes de onda de la radiación: los virus y las bacterias son más susceptibles a las longitudes de onda más cortas de la gama UV, mientras que otras bacterias son susceptibles a longitudes de onda ligeramente más largas (Nelson et al., 2018). La acción germicida en la desinfección solar del agua potable se atribuye a las longitudes de onda que llegan a la superficie de la Tierra. Aunque la UVC se absorbe durante su paso por la atmósfera y puede despreciarse, la UVB no suele tenerse en cuenta cuando se estiman los aspectos físicos y microbiológicos del proceso (Giannakis, 2016). La superficie del catalizador, al ser irradiada, crea sitios activos para la producción de ROS, dando lugar al inicio del proceso de inactivación (Ganguly, 2018).

Figuras 19

Medidas de Longitud de Onda



Nota: En esta figura se dan a conocer la gráfica de las distintas medidas de Medidas de Longitud de Onda, publicados en los artículos consultados. Fuente: Autores

Según Chong et al. (2010), los efectos fotoquímicos de las fuentes de luz con diferentes rangos de emisión de longitud de onda tendrán una profunda consecuencia en la velocidad de reacción fotocatalítica, dependiendo de los tipos de fotocatalizadores utilizados, la fase cristalina, su composición y cualquier estado de modificaciones del fotocatalizador, Mosteo et al. (2020), la

longitud de onda de la radiación tiene un efecto significativo en la inactivación bacteriana. Según estos investigadores, existen estudios que han mostrado que el daño endógeno en *Escherichia coli* disminuye a medida que aumenta la longitud de onda en el rango solar. Sin embargo, se ha documentado la fotoinactivación de bacterias mediante exposición a diferentes longitudes de onda de luz visible. La acción de la luz solar no se limita a mutaciones del genoma por UV, sino que desencadena eventos oxidativos que resultan en la inactivación de los microorganismos. García-Fresnadillo (2018), señala que el proceso de desinfección solar se produce en el rango de 360-700 nm, que incluye tanto la luz ultravioleta como la visible. El efecto fotodinámico del oxígeno singlete es responsable de la fotoinactivación bacteriana observada, y es el factor que determina si se puede lograr o no la desinfección para una dosis de radiación solar determinada. Por otra parte, Curtis et al. (1992), señalan que la presencia de sensibilizadores puede influir en la eficacia de las distintas longitudes de onda de la radiación en el proceso de desinfección. En concreto, el artículo sugiere que la capacidad de las longitudes de onda de >425 nm para dañar a los coliformes fecales dependía de la presencia de sensibilizadores disueltos, muy presentes en las aguas residuales brutas y que no se veían afectados por el tratamiento de las mismas.

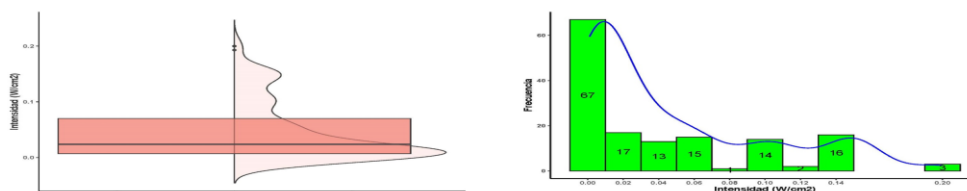
En la figura 19, muestra que autores como, Ripolles-Avila et al. (2019), utilizaron radiación UV en un rango específico (315-400 nm) para observar la resistencia de diferentes microorganismos. Se encontró que el microorganismo *Salmonella enterica var. Enteridis* fue el más resistente a la luz UV empleada, posiblemente debido a que esta se consideró de tipo UV-A y no tuvo efecto bactericida contra este patógeno. Además, tanto las Nanopartículas (NPs) de TiO₂ expuestas a UV como las no expuestas mostraron actividad antibacteriana dosis-dependiente contra varias bacterias, tanto Gramnegativas como Grampositivas, y afectaron su crecimiento.

Intensidad de la Luz

La intensidad de la luz es importante para la desinfección fotocatalítica. Cuando se ilumina la superficie de un catalizador, se producen especies reactivas del oxígeno (ROS) que inactivan los microorganismos. A mayor intensidad de luz, mayor producción de ROS y más efectiva es la desinfección. Sin embargo, la superficie del desinfectante también afecta la producción de ROS. Por ejemplo, en caso de utilizar TiO_2 como semiconductor UV activo, la desinfección es limitada cuando se irradia con luz solar, ya que solo una pequeña parte es UV. En estos casos, la superficie del desinfectante es crucial para una desinfección eficaz (Ganguly, 2018). Según Pichel et al. (2019), la intensidad de la luz afecta el proceso de desinfección de distintos métodos. En general, una mayor intensidad luminosa ayuda a desinfectar de manera más eficaz. En el caso de la desinfección solar (SODIS), una mayor intensidad luminosa inactiva de forma más rápida a los microorganismos. La cantidad de luz solar que llega a la tierra depende de la ubicación, la estación del año y la hora del día.

Figuras 20

Medidas de la Intensidad Luminosa



Nota: En esta figura se dan a conocer la gráfica de las distintas medidas de Medidas de la Intensidad Luminosa, publicados en los artículos consultados. Fuente: Autores

Por su parte, Malato et al. (2009), menciona que, la intensidad de la luz es importante en el proceso de desinfección. Se compararon los resultados de desinfectar una suspensión bacteriana con diferentes intensidades de radiación UV-A durante diferentes períodos de tiempo. Se llegó a la conclusión de que la desinfección no depende proporcionalmente de la intensidad de la radiación UV solar, siempre y cuando se reciban suficientes fotones para la desinfección. El mínimo de energía UV necesario para la inactivación completa depende del tipo de microorganismo y de la configuración del reactor. En la figura 20 aparecen las medidas de la intensidad luminosa reportadas por los distintos autores, entre éstas, Kim et al. (2019b), encontraron que, la eficacia de la inactivación microbiana aumentó con la intensidad de la luz utilizada para generar el $^1\text{O}_2$, lo que resultó en una mayor inactivación de *Escherichia coli* y MS2 en tiempos más cortos. Además, la cantidad de $^1\text{O}_2$ generado también aumentó con la intensidad de la luz, lo que sugiere que la generación de $^1\text{O}_2$ microbicida aumenta con la intensidad de la luz utilizada.

Tiempo de exposición

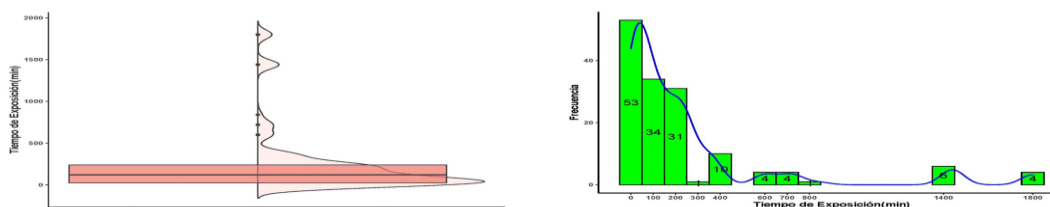
El tiempo de irradiación es un factor importante en el proceso de tratamiento de agua mediante fotodesinfección, ya que afecta directamente la cantidad de energía absorbida por el fotosensibilizador y, por lo tanto, la cantidad de ROS generados. En este sentido, Melián et al. (2000), mencionan que el tiempo necesario para lograr una reducción del 95% de la población bacteriana inicial es menor con TiO_2 que sin el catalizador. Concretamente, se tarda 30 minutos con TiO_2 y unos 112 minutos sin el catalizador. Por su parte, según Malato et al. (2009), la exposición continua a la luz es más efectiva para matar bacterias que la exposición intermitente. Esto puede ser debido a los mecanismos de reparación que permiten a las bacterias reactivarse

después del tratamiento. Además, la radiación puede causar daño parcial que no elimina totalmente todas las colonias de bacterias en el agua.

De acuerdo con la figura 21, se reportan los diferentes tiempos de exposición, en que se llevaron a cabo los diferentes métodos de desinfección, donde se observa una marcada tendencia por parte de los investigadores a hacer uso de tiempos similares, convirtiéndose de esta manera la repetición de esta condición, ya que ha demostrado los resultados esperados, anotados por distintos autores, por ejemplo, Kim et al. (2019a), destacan la importancia del tiempo de irradiación en el proceso de desinfección. Se encontró que la eficacia de desinfección contra *Escherichia coli* aumentó de manera significativa después de 60 minutos de irradiación a una intensidad de luz de 50 mW/cm^2 , mientras que la eficacia contra MS2 aumentó después de 30 minutos, indicaron que la eficacia de la inactivación microbiana aumentó con el tiempo de irradiación, lo que resultó en una mayor inactivación de *Escherichia coli* y MS2. Además, se encontró que la eficacia de la inactivación microbiana también aumentó con la intensidad de la luz utilizada para generar el $^1\text{O}_2$.

Figuras 21

Tiempo de exposición reportado en los artículos



Nota: En esta figura se dan a conocer la gráfica de las distintas medidas de Tiempo de exposición, publicados en los artículos consultados. Fuente: Autores

De igual manera, para Li et al. (2016), el tiempo de irradiación tuvo un efecto significativo en la eficiencia de inactivación viral. En los experimentos, la inactivación del virus MS2 aumentó de ~4.5 log a ~6 log cuando la concentración de fotocatalizador se incrementó de 50 mg/L a 100 mg/L y el tiempo de irradiación fue de 360 minutos. Además, se indica que los virus fueron muestreados después de 0, 60, 120, 180, 240, 300 y 360 minutos de iluminación. Estos resultados sugieren que el tiempo de irradiación es un factor importante en la eficacia de la inactivación viral mediante fotocátalisis con $g\text{-C}_3\text{N}_4$ y luz visible, además Ryberg et al. (2018), demostraron que al mejorar el método SODIS con eritrosina, se logró una inactivación del virus superior al 99,99% en solo 5 minutos en la mayoría de los países en desarrollo. Esto representa una reducción significativa en el tiempo necesario para desinfectar el agua en comparación con el método SODIS tradicional, disminuyendo el tiempo de tratamiento en 2 órdenes de magnitud. Además, esta mejora se logra sin aumentar significativamente los costos, ya que la eritrosina es un colorante comestible, por su parte, según, Cates et al. (2015), los resultados obtenidos en el estudio mostraron que, bajo excitación láser, la eficacia de la conversión ascendente (UC) se estimó en un orden de magnitud superior a la registrada anteriormente bajo excitación con lámpara. Los materiales UC provocaron la inactivación de 3,6 log de *Escherichia coli* en 20 minutos. Sin embargo, cuando se utilizó luz solar natural concentrada, no se observó ninguna inactivación adicional que pudiera atribuirse a la UC en la escala de tiempo estudiada, mientras que, Cheng et al. (2018), utilizaron el tiempo de 40 minutos, para evaluar el rendimiento fotocatalítico de desinfección del agua del vidrio piramidal de MoS_2 . Esta duración se eligió para evaluar la eficacia del fotocatalizador en la desvitalización de bacterias *Escherichia coli* en

una solución de cloruro sódico bajo luz visible. Observando los índices de supervivencia bacteriana en función del tiempo, el autor pudo determinar la eficacia del vidrio piramidal de MoS₂ para desinfectar el agua en un plazo específico.

Tipo de lámpara

Según, Pichel et al. (2019), las lámparas utilizadas en el proceso de desinfección UV requieren una cantidad significativa de energía a lo largo de su vida útil, incluyendo su fabricación y operación. Además, las lámparas deben ser reemplazadas cada 6-12 meses, lo que implica reemplazos frecuentes y el uso de energía adicional para la fabricación y el transporte. También hacen referencia que las lámparas desechadas generan un problema de gestión de residuos porque contienen mercurio, que es peligroso. Por lo tanto, se debe reducir el impacto ambiental de las lámparas mediante el reciclaje para recuperar materiales reutilizables y controlar las emisiones de mercurio al medio ambiente. Por su parte, Gómez-Couso et al. (2009), utilizaron una lámpara de arco de xenón de 1000 W para simular la radiación solar en el experimento de laboratorio, ya que es capaz de proporcionar una amplia gama de longitudes de onda, incluyendo la radiación ultravioleta (UV) que es responsable de la inactivación de los microorganismos. Además, el filtro solar de masa de aire 1.0 utilizado en la lámpara tiene un corte nítido a 320 nm, lo que permite simular la radiación solar natural en la región de longitud de onda que es más efectiva para la inactivación de *Cryptosporidium*.

En cuanto a las publicaciones objeto de la revisión, hay que decir que, por ejemplo, Li et al. (2016), utilizaron una lámpara de xenón de 300 W (Philips) con un filtro de corte UV para proporcionar luz visible ($\lambda \geq 400$ nm) con una intensidad de iluminación media de 150 mW/cm², que era adecuada para activar el fotocatalizador g-C₃N₄, los autores, Xia et al. (2015), usaron en su método, una lámpara de xenón con filtro de corte UV, que se utilizó como fuente de luz para

la inactivación bacteriana fotocatalítica porque la radiación UV puede dañar el ADN de las células bacterianas y, por lo tanto, inactivarlas. Además, la lámpara de xenón es capaz de emitir una amplia gama de longitudes de onda, lo que permite una mayor eficiencia en la inactivación bacteriana. Además, se realizaron experimentos bajo luz solar en días soleados con un monitoreo oportuno de la intensidad de la luz. Por su parte, Cates et al. (2015), utilizaron una lámpara de mercurio en el proceso para proporcionar radiación UVC. Se sabe que la radiación UVC tiene propiedades germicidas y puede inactivar eficazmente las bacterias. Los investigadores querían comprobar la eficacia de la cerámica de conversión ascendente en presencia de la radiación UVC de la lámpara de mercurio. En este sentido, es habitual utilizar lámparas de xenón en experimentos fotocatalíticos debido a su amplio espectro y alta intensidad, que pueden proporcionar energía suficiente para activar el fotocatalizador e inducir las reacciones químicas deseadas (Heraeus Group, s. f.)

Eficiencia de la Fotodesinfección

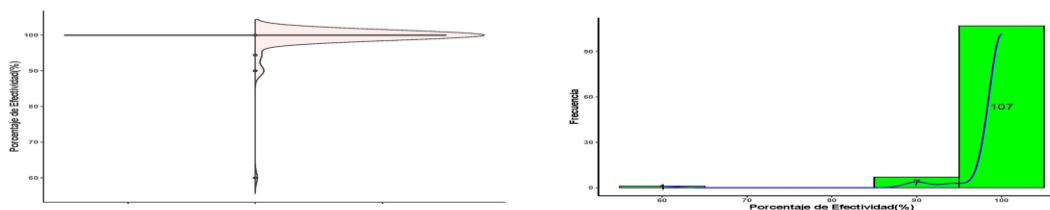
En un estudio realizado, por Xia et al. (2015), encontraron que, el fósforo rojo es un fotocatalizador efectivo para la inactivación bacteriana bajo luz visible y que su eficacia es comparable a la de otros fotocatalizadores más costosos y menos abundantes. Además, hallaron que la lámpara LED azul tenía la mejor eficacia bactericida debido a que su longitud de onda se superpone con el borde de absorción de la fosforina roja. También encontraron que la inactivación bacteriana bajo irradiación solar fue más lenta que bajo irradiación de lámpara de xenón, pero aun así se logró una pérdida de 2×10^7 CFU mL⁻¹ en 90 minutos de irradiación con luz visible. Según, Li et al. (2016), el estudio es que la fotocatálisis con g-C₃N₄ es una solución más eficiente para la desinfección viral que la desinfección UV. La fotocatálisis con g-C₃N₄ inactivó completamente el virus MS2 en lugar de simplemente suprimir su capacidad de

crecimiento y reproducción, como se observó en la desinfección UV. Además, la eficiencia de la inactivación viral aumentó con la concentración de g-C₃N₄ y el tiempo de irradiación

Mientras que, Deng et al. (2017) mostraron que los compuestos g-C₃N₄-AgBr presentaban una excelente actividad antibacteriana frente a *Escherichia coli* bajo irradiación de luz visible. Se observó que la eficacia de desinfección del g-C₃N₄-AgBr dependía de la intensidad de la irradiación con luz visible, la concentración de g-C₃N₄-AgBr y la concentración celular inicial. La mayor eficacia de desinfección se obtuvo a 64 mW/cm². El estudio concluyó que los compuestos de g-C₃N₄-AgBr tienen un gran potencial para su uso en la desinfección de bacterias en el tratamiento de aguas y otros campos relacionados. podemos observar el comportamiento de del porcentaje de efectividad del tratamiento reportado por distintos autores, vemos que la efectividad a la hora de eliminar bacterias, hongos y virus es aproximadamente del 100 %, es decir ocurre inactivación total de los microorganismos

Figuras 22

Eficiencia reportada durante la desinfección



Nota: En esta figura se dan a conocer la gráfica de las distintas Eficiencia reportada, publicada en los artículos consultados. Fuente: Autores

Por su parte, Kim et al (2019), hallaron que el porcentaje de efectividad en el proceso de desinfección dependió de varios factores, como la intensidad de la luz, la concentración de RB y la presencia de oxígeno disuelto. Según ellos, la inactivación de *Escherichia coli* y MS2 aumentó con la intensidad de la luz utilizada para generar $^1\text{O}_2$. Además, indicaron que se utilizaron diferentes concentraciones de RB para generar $^1\text{O}_2$ y se encontró que la eficacia de la inactivación microbiana aumentó con la concentración de RB. La presencia de oxígeno disuelto también fue un factor importante, ya que el $^1\text{O}_2$ se genera en presencia de oxígeno Cheng et al. (2018), observaron que, el porcentaje de eficacia en el proceso de desinfección se vio afectado significativamente por la presencia de la pirámide MoS2 y la irradiación de luz visible. Sin pirámide MoS2 y en ausencia de luz visible, no se produjo ningún efecto de desinfección y las bacterias permanecieron vivas en su mayor parte. Sin embargo, cuando la pirámide de MoS2 estaba presente e iluminada con luz visible, aproximadamente el 81,3% de las bacterias se desvitalizaron eficazmente en 40 minutos. Como resultado, el efecto fotocatalítico de la pirámide de MoS2, combinado con la luz visible, desempeñó un papel crucial en el proceso de desinfección.

Comparación acerca de la Eficiencia de la Especie Reactiva Oxígeno Molecular Singulete ($^1\text{O}_2$) con Relación a otros Métodos de Desinfección.

Para analizar la efectividad, del proceso desinfección utilizando oxígeno molecular singulete, hizo la comparación, de este método con diferentes métodos convencionales de desinfección, de amplio uso, como: cloración, cloraminación, dióxido de cloro, proceso foto-Fenton y ozono, y con ello poder conocer la competitividad de la metodología frente a los métodos tradicionales. Para exponer la utilidad del proceso de desinfección con uso de oxígeno molecular singulete, se pueden dar a conocer dos argumentos, (a) la competitividad del método

utilizado y (b) la efectividad de este, tal y como se plantea en la Tabla 4 La desinfección constituye generalmente la etapa final del proceso de tratamiento del agua potable, y su finalidad es eliminar los microorganismos patógenos responsables de las enfermedades transmitidas por el agua. Este paso puede controlarse mediante métodos físicos y químicos que reducen sustancialmente el número total de microorganismos viables dentro del agua, contribuyendo así a la protección de la salud pública. Las tecnologías convencionales de tratamiento del agua potable incluyen métodos físicos como la floculación y la sedimentación, la filtración, la radiación ultravioleta (UV) y la pasteurización, y métodos químicos que consisten en la adición de sustancias químicas (por ejemplo, la cloración, la cloraminación, el tratamiento con dióxido de cloro y la ozonización). Sin embargo, sólo la radiación, el calor y los métodos químicos pueden denominarse técnicamente desinfección, porque inactivan o destruyen los microorganismos patógenos en lugar de simplemente eliminarlos (Collivignarelli et al., 2017). Según Gerba y Pepper (2019), la eficacia de los distintos métodos de desinfección del agua para eliminar los agentes patógenos varía en función del agente patógeno específico y de la calidad del agua de origen. De acuerdo con lo anterior, y basándonos en el sentido de esta investigación, en la Tabla 4, se efectúa una comparación de algunas investigaciones que se han hecho usando como método de desinfección convencionales, químicos y el método de desinfección objeto de estudio de esta investigación.

Tabla 4

Comparación de la eficiencia de la especie reactiva oxígeno molecular singulete (1O_2) con otros métodos de desinfección

Proceso de Desinfección	Porcentaje de inactivación de microorganismos	Referencia
Cloración	99,95 y >99,99998 %	(Berg et al., 1978)
Cloraminación	99,4 y >99,8 %	(Meyer et al., 1989)
Dióxido de Cloro	>99 %	(Benarde et al., 1965)
Ozonización	98-99 %	Demir, F., & Atguden, A. (2015)
Proceso Foto-Fenton	51,9-73,1 %	Gómez Fajardo (2012)
Oxígeno Molecular Singulete	100 %	(Bartusik et al., 2012)

Nota: Se muestra la comparación de la eficiencia de la especie reactiva oxígeno molecular singulete con otros métodos de desinfección. Fuente: Los Autores

Se pudo evidenciar que los métodos de desinfección examinados mostraron una gran eficiencia al momento de ser aplicados con un porcentaje de inactivación que variaba entre 51,9 y 100 %, que, en el mejor de los casos presentó inactivación total de los microorganismos expuestos al método de desinfección considerado. En términos generales, se presentan algunas consideraciones, que son importantes a la hora aplicar determinado método de tratamiento, entre lo que se debe considerar realizada la revisión de los distintos métodos, destacamos que en cuanto a la cloración, aunque tiene más ventajas que otros desinfectantes, el principal inconveniente del uso del cloro es que reacciona con la materia orgánica natural generando subproductos de la desinfección y ácidos haloacéticos tóxicos, mutagénicos y cancerígenos, que son peligrosos para las personas y el medio ambiente (Glaze, 1987), además en los efluentes clorados, los coliformes fecales y otras bacterias indicadoras se destruyen más rápidamente que los virus. Esto significa que las bacterias pueden desaparecer antes de que los virus sean

eliminados por completo. Esto es un problema si el volumen de efluente examinado para las bacterias está limitado y el volumen para los virus no lo está. Por lo tanto, los efluentes clorados pueden contener virus y ser potencialmente peligrosos, incluso si no contienen bacterias indicadoras según las pruebas estándar (Berg et al., 1978), por su parte, el tratamiento del agua mediante cloraminación (la combinación de cloro libre y amoníaco) ha sido uno de los procesos de desinfección más populares porque las cloraminas no forman THM (Trihalometanos). Sin embargo, las cloraminas son oxidantes débiles, por lo que se están considerando oxidantes más potentes, en particular el ozono y el dióxido de cloro, como sustitutos del cloro al principio y en la mitad del proceso de tratamiento. (Glaze, 1987).

Normalmente, la cloraminación de campo produce una mezcla de especies de cloro con diferentes capacidades de desinfección, cada una en equilibrio con las otras, dependiendo del pH, las concentraciones relativas de cloro y amoníaco aplicadas y el método de aplicación (Glicker & Edwards, 1991), mientras que el dióxido de cloro es más efectivo para matar microorganismos cuando se utiliza en concentraciones altas, se mantiene en contacto con ellos durante un periodo de tiempo más largo y se utiliza en aguas con altas temperaturas. Sin embargo, la presencia de altas concentraciones de sólidos suspendidos y contaminantes orgánicos en el agua puede disminuir significativamente la eficacia de la desinfección con dióxido de cloro (Ayyıldız et al., 2009). Por consiguiente, según Singer (1990), el ozono es un biocida muy eficaz. Su principal limitación como desinfectante es su inestabilidad en el agua. Por este motivo, el ozono no puede utilizarse como desinfectante final en el sistema de distribución. Sin embargo, puede utilizarse como desinfectante primario, pero, también en este caso, su eficacia está limitada por su rápida velocidad de descomposición y su reacción con los contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua. En vista de todas estas desventajas evidenciadas al momento de hacer una comparación

entre las diferentes tecnologías convencionales de tratamiento de agua potable, surgen otras alternativas como los procesos avanzados de oxidación PAOs, entre los que se encuentra la reacción foto-Fenton son una alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias orgánicas, así como para la desinfección. (Potosí Rodríguez, 2016). El proceso foto-Fenton, con concentración bajas de catalizador, de peróxido de hidrogeno y a pH cercanos a la neutralidad, resultó ser eficiente en el proceso de desinfección de las bacterias *Salmonella typhimurium*, *Shigella sonnei* y *Escherichia coli*, de manera individual o la mezcla de ellas en solución (Potosí Rodríguez, 2016), aunque esta eficiencia resulto mucho menor comparada con los demás tratamientos. Por último, para darle fin a la comparación, el uso de oxígeno molecular singlete en la desinfección de aguas y que según, Bartusik et al. (2012), en un estudio realizado, evidenciaron que los resultados implicaban que el $^1\text{O}_2$, incluso cuando no está totalmente disuelto, puede inactivar los microbios, y dado que, el oxígeno singlete se forma cuando hay oxígeno molecular, un fotosensibilizador y la exposición adecuada a la luz. Esto puede ser utilizado para la desinfección del agua o para degradar contaminantes en procesos fotocatalíticos (Pibiri et al., 2018).

Lo que evidencia la gran efectividad de dicha especie como desinfectante y que lo hace igual o mejor, en cuanto a su aplicabilidad en el tratamiento de aguas para consumo humano, el cual hace que esta tecnología sea altamente competitiva frente a los métodos de tratamiento convencionales.

Algunas Limitaciones o Desventajas en el Uso de Oxígeno Singlete como Desinfectante de Agua Potable

La desinfección del agua con oxígeno singlete, también conocida como procesos de oxidación avanzada (AOP) que utilizan oxígeno singlete, ofrece varias ventajas para la desinfección del agua. Sin embargo, también existen algunas desventajas o limitaciones asociadas a este enfoque. Entre las que podemos destacar son las siguientes:

Algunos investigadores como Wang et al. (2024), mencionan que, el oxígeno singlete tiene una vida útil muy corta, lo que dificulta su aplicación en la desinfección a larga distancia, además puede ser afectado por diversos factores ambientales, como la temperatura, la humedad y la presencia de otros compuestos químicos, lo que puede disminuir su eficacia como agente desinfectante. Por otra parte, según Azamzam et al. (2021), la desinfección del agua con oxígeno singlete no es un proceso automático; requiere una fuente de energía, como una fuente de luz externa, para generar oxígeno singlete, que puede ser costosa, lo que podría convertirse en una limitación al momento de elegir esta técnica como estrategia de desinfección del agua potable, y además, es difícil conseguir una solución muy estable de oxígeno singlete en el agua porque se trata de una molécula muy reactiva, en este sentido Q. Li & Li (2021b), señalan que, el rendimiento del oxígeno singlete se reduce significativamente en presencia de sustancias orgánicas, lo que disminuye la eficacia de la desinfección. También en cuanto a limitaciones, L. Wang et al. (2023), anotan que, el oxígeno molecular singlete, $^1\text{O}_2$, tiene una actividad de amplio espectro, lo que puede llevar a sobreestimar su papel en la degradación de contaminantes, y no es altamente selectivo para contaminantes orgánicos específicos, lo que significa que puede no ser la opción más eficaz en algunos casos. Los métodos utilizados para identificar y evaluar el papel del $^1\text{O}_2$ presentan inconvenientes que pueden dificultar la detección y cuantificación precisas de su

actividad. Por su parte, Kokkinos et al. (2021), la tecnología de desinfección del agua con oxígeno singlete todavía puede considerarse inmadura, por lo que requiere más investigación y desarrollo para abordar sus limitaciones y mejorar su eficacia.

Resulta importante señalar que, si bien existe claridad en que se ha hecho un trabajo considerable para recopilar y resumir información relevante acerca del uso del oxígeno singlete como tecnología para desinfección de agua potable; es importante lograr ampliar esta evaluación a través de la reflexión relacionada con algunos aspectos críticos que ayuden a establecer su orientación hacia futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

Primero, se usó con éxito una buena metodología llamada PRISMA la cual funcionó de manera correcta en su aplicación, pero, resulta importante debatir si los criterios utilizados para la inclusión y exclusión de estudios lograron capturar de manera general todas las diferentes investigaciones disponibles, aunque las bases de datos escogidas son de buena calidad científica, resulta un poco probable que, pudieron haberse dejado por fuera estudios importantes al solo considerar dichas fuentes, es posible que al limitarse a ellas se hayan excluido estudios relevantes, especialmente aquellos estudios publicados en contextos locales o en revistas de menor visibilidad internacional, lo que quizás, podría haber reducido el alcance de los hallazgos, especialmente en regiones donde la implementación de esta tecnología es más urgente, como en países en desarrollo y además, ampliar el análisis para incluir literatura "gris", como tesis de pre y posgrado, actas de congresos, informes de investigación, memorias, proyectos, patentes, lo que permitiría obtener una visión más completa y práctica del tema.

Otro aspecto que resulta importante señalar y merece especial atención es resaltar la comparación entre el oxígeno singlete y métodos tradicionales de desinfección, como la cloración, la cloraminación, uso de dióxido de cloro, la ozonización, y el proceso Foto-Fenton, y

pese que, estas comparaciones son valiosas, también sería de mucha ayuda hacer una profundización en los contextos específicos donde cada tecnología podría ser más eficaz. Por ejemplo, el uso de oxígeno molecular singlete en la desinfección de agua potable, podría resultar de gran utilidad en aquellas regiones en donde existan limitaciones energéticas o en zonas rurales donde el acceso a productos químicos para la cloración es limitado, tener una consideración en este aspecto podría ayudar a identificar no solo la eficacia técnica de cada método, sino también su aplicabilidad práctica en situaciones diversas.

Y si bien esta tecnología parece prometedora, su adopción puede verse limitada si los materiales son costosos o requieren condiciones de producción complejas. Es aquí donde surge la oportunidad de reflexionar acerca de la sostenibilidad de esta tecnología. Si queremos generalizar su uso, es esencial darle prioridad a la investigación en fotosensibilizadores que no solo sean eficaces, sino también asequibles y ecológicamente responsables, es decir, que, esta tecnología no genere subproductos tóxicos, y sería pertinente evaluar el impacto ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida, su producción hasta su disposición final.

Finalmente, en lo referente al rol de la normatividad y validación local la implementación de esta tecnología en sistemas reales requiere no solo pruebas técnicas, sino además un marco normativo que respalde su adopción, como entraría por ejemplo a complementarse con la Resolución 2115 de 2007, aún no existe claridad cómo se validaría esta tecnología para su uso en diferentes regiones, en esta parte, podría representar una gran ayuda promover estudios piloto que muestren evidencia local, adaptada a las condiciones específicas de cada zona, con lo que, no solo se fortalecería la aceptación por parte de las autoridades, sino además certificaría su efectividad en entornos reales

Conclusiones

La fotosensibilización con oxígeno singlete puede ser efectiva para la eliminación de microorganismos patógenos en el agua potable, incluyendo bacterias, virus y otros microorganismos. El oxígeno singlete es altamente reactivo y puede dañar las estructuras celulares de estos patógenos, lo que reduce su viabilidad.

A diferencia de otros desinfectantes químicos, como el cloro, la fotosensibilización con oxígeno singlete no deja residuos químicos dañinos en el agua y no produce subproductos tóxicos. Esto puede hacer que sea una opción más respetuosa con el medio ambiente.

El proceso de desinfección con oxígeno molecular singlete es un método altamente eficaz para la desinfección del agua potable, ya que logra una inactivación del 100% de los microorganismos objetivo en las condiciones de prueba, al comparar dicho método, puede decirse que consigue ser una opción muy prometedora para la desinfección del agua potable, superando a otros métodos convencionales como la cloración, la cloraminación, el dióxido de cloro y la ozonización en términos de eficacia. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la efectividad de cualquier método de desinfección puede verse afectada por factores como las condiciones del agua y la implementación adecuada del proceso.

Al analizar la información relacionada con el proceso de desinfección utilizando oxígeno molecular singlete y utilizando bases de datos reconocidas en el campo de interés, se observa cuáles de ellas proporcionan resultados más destacados. Mediante el uso de operadores booleanos como "AND," se descubrió que las bases de datos consultadas tuvieron el siguiente desempeño: el 44.79% (2808) de los artículos se encontraron en la base de datos de ScienceDirect, el 34.30% (2150) en la base de datos de Springer Link, mientras que el 5.77% (362) y el 4.91% (308) se localizaron en las bases de datos de Oxford Journals y ACS,

respectivamente. También es importante mencionar que los porcentajes más bajos de artículos encontrados correspondieron a las bases de datos de Dialnet con un 0.19% y Scielo con un 0.02% de las búsquedas. Esto demuestra que ScienceDirect y Springer Link ofrecen resultados más sólidos en relación con el tema en cuestión y son esenciales como fuentes de apoyo para la investigación relacionada con el tema objeto de estudio.

Para lograr una desinfección eficaz con oxígeno singlete, se recomienda mantener un pH controlado. El pH es un factor crítico que afecta la eficacia de este proceso, ya que el oxígeno singlete es altamente reactivo y se genera cuando se exponen moléculas de oxígeno a ciertas longitudes de onda de luz ultravioleta. Esta forma de oxígeno es eficaz para eliminar bacterias y virus al oxidar sus componentes celulares. Sin embargo, el pH del entorno puede influir en su capacidad para desinfectar. Cuando el pH es demasiado bajo (en un entorno ácido), el oxígeno singlete se descompone rápidamente y pierde su poder desinfectante. Por otro lado, si el pH es demasiado alto (en un entorno alcalino), el oxígeno singlete reacciona con otras moléculas presentes y se vuelve inactivo. Por lo tanto, es esencial controlar el pH durante la desinfección con oxígeno singlete, generalmente mediante la adición de reguladores de pH. Además, es crucial realizar la desinfección en un entorno controlado para minimizar la exposición del oxígeno singlete a factores que puedan afectar su capacidad de desinfección.

La desinfección del agua con oxígeno singlete, a través de procesos de oxidación avanzada (AOP), presenta beneficios significativos y también desventajas o limitaciones. Entre las ventajas se encuentran su alta capacidad oxidativa, versatilidad en procesos impulsados por energía solar y su eficacia en la eliminación de bacterias. Sin embargo, las limitaciones incluyen la corta vida útil del oxígeno singlete, su sensibilidad a factores ambientales y la necesidad de una fuente de energía externa costosa, que plantean desafíos prácticos y económicos. La falta de

selectividad para contaminantes específicos y la inmadurez tecnológica también resaltan la necesidad de más investigación y desarrollo. Aunque el oxígeno singlete muestra promesa en la desinfección del agua, su implementación exitosa requiere abordar estas limitaciones para asegurar su eficacia y viabilidad a largo plazo.

Esta investigación reveló que el oxígeno molecular singlete es una alternativa prometedora para la desinfección de agua potable, ofreciendo una opción más sostenible y adaptable en comparación con los métodos tradicionales. Su implementación podría ayudar a mejorar el acceso al agua potable, especialmente en áreas rurales, donde se ha observado un retroceso significativo entre 2020 y 2021, que se han visto afectadas en este aspecto. Además, esta alternativa se busca contribuir al ODS 6, a fin de garantizar agua limpia y saneamiento para todos, ayudando a cerrar las brechas existentes y avanzar hacia las metas establecidas para 2030.

Referencias bibliográficas

- Acosta Castellanos, P. M., Caro Camargo, C. A., & Perico Granados, N. R. (2016). Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV. *Revista de Tecnología*, 14(2). <https://doi.org/10.18270/rt.v14i2.1874>
- Al-Shamma'a, A., Pandithas, I., & Lucas, J. (2001). Low-pressure microwave plasma ultraviolet lamp for water purification and ozone applications. *Journal of Physics D*, 34(18), 2775-2781. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/18/310>
- Azamzam, A. A., Rafatullah, M., Yahya, E. B., Ahmad, M. I., Lalung, J., Alharthi, S., Alosaimi, A. M., & Hussein, M. A. (2021). Insights into solar disinfection enhancements for drinking water treatment applications. *Sustainability*, 13(19), 10570. <https://doi.org/10.3390/su131910570>
- Apella MC, Araújo PZ. (2005). Microbiología de agua. Conceptos básicos. En: Blesa MA, Blanco-Gálvez J, editores. *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*. Buenos Aires: UNSAM; p. 27–44. Disponible en: www.psa.es/webesp/projects/solarsafewater/documents/libro/02_Capitulo_02.pdf
- Ayyıldız, Ö., İleri, B., & Sanik, S. (2009). Impacts of water organic load on chlorine dioxide disinfection efficacy. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 1092-1097. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.153>
- Bartusik, D., Aebisher, D., Lyons, A. M., & Greer, A. (2012). Bacterial inactivation by a singlet oxygen bubbler: Identifying factors controlling the toxicity of 1O_2 bubbles. *Environmental Science & Technology*, 46(21), 12098-12104. <https://doi.org/10.1021/es303645n>

enarde, M. A., Israel, B. M., Olivieri, V. P., & Granstrom, M. L. (1965). Efficiency of chlorine dioxide as a bactericide. *Applied microbiology*, 13(5), 776-780.

<https://doi.org/10.1128/am.13.5.776-780.1965>

Berg, G., Dahling, D. R., Brown, G. T., & Berman, D. (1978). Validity of fecal coliforms, total coliforms, and fecal streptococci as indicators of viruses in chlorinated primary sewage effluents. *Applied and Environmental Microbiology*, 36(6), 880-884.

<https://doi.org/10.1128/aem.36.6.880-884.1978>

Boyd, I. W., & Zhang, J. (1997b). New large area ultraviolet lamp sources and their applications. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions with Materials and Atoms*, 121(1-4), 349-356. [https://doi.org/10.1016/s0168-583x\(96\)00538-1](https://doi.org/10.1016/s0168-583x(96)00538-1)

Boyraz YK, Demir LS, Eken K, Tabara MF, Evcı R, Durduran Y, Uyar M, Şahin TK.

Determination of usage frequency of household type water purifiers and effects on drinking water quality in Meram. *Turk Hij Den Biyol Derg*, 2019; 76(2): 149-156

Caslake, L., Connolly, D., Menon, V., Duncanson, C., Rojas, R., & Tavakoli, J. (2004).

Disinfection of Contaminated Water by Using Solar Irradiation. Fecha de acceso: 15 jul. 2019, Disponible en: <https://aem.asm.org/content/aem/70/2/1145.full.pdf>

C.C.E. Meulemans (1987) The Basic Principles of UV-Disinfection of Water, Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association, 9:4, 299-313, DOI: 10.1080/01919518708552146

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente División de Salud y Ambiente. (2002). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua. Manual de capacitación para operadores. Lima. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org>.

- Chiva, S., Berlanga, J., Martínez, R. y Climent J. (2017). Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua. *Publicacions de la Universitat Jaume I*, 4(1), 1-170.
- Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W., & Saint, C. P. (2010). Recent Developments in Photocatalytic Water Treatment Technology: a review. *Water Research*, 44(10), 2997-3027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S., & Torretta, V. (2017). Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. *Sustainability*, 10(2), 86. <https://doi.org/10.3390/su10010086>
- Comini, L., & Montoya, S. (2016). Fotosensibilizadores Naturales Activos en Terapia Fotodinámica. Recuperado 30 octubre, 2019, de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/Bitacora/article/view/16316>
- Curtis, T. P., Mara, D. D., & Silva, S. A. (1992). Influence of pH, oxygen, and humic substances on ability of sunlight to damage fecal coliforms in waste stabilization pond water. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(4), 1335-1343. <https://doi.org/10.1128/aem.58.4.1335-1343.1992>
- Del Puerto Rodríguez, Asela María, Concepción Rojas, Miriam, & Iglesias Fernández, Ana Margarita. (1999). Calidad del agua y enfermedades de transmisión digestiva. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 15(5), 495-502. Recuperado en 28 de octubre de 2019, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S086421251999000500001&lng=es&tlng=es.

- Demir, F., & Atguden, A. (2015). Experimental investigation on the microbial inactivation of domestic well drinking water using ozone under different treatment conditions. *Ozone-science & Engineering*, 38(1), 25-35. <https://doi.org/10.1080/01919512.2015.1074534>
- Deng, J., Liang, J., Li, M., & Tong, M. (2017). Enhanced visible-light-driven photocatalytic bacteria disinfection by g-C₃N₄-AgBr. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 152 (2017) 49–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.01.003>
- DeRosa, M. C & Crutchley R.J. (2002). Photosensitized singlet oxygen and its applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 233-234, 351-371. [https://doi.org/10.1016/s0010-8545\(02\)00034-6](https://doi.org/10.1016/s0010-8545(02)00034-6)
- Durán-Álvarez, JC; Avella, E; Zanella, R. Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, [S.l.], v. 8, n. 14, p. 17-39, sep. 2015. ISSN 2448-5691. Disponible en: <<http://revistas.unam.mx/index.php/nano/article/view/52510/46747>>. Fecha de acceso: 15 jul. 2019 doi: <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2015.14.52510> .
- Fernández Ibáñez, P. (2010). Procesos de fotocatalisis solar para la detoxificación y descontaminación de aguas. Fecha de acceso: 17 Julio 2019, Disponible en: <http://revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/102/256>
- Gamage, J., & Zhang, Z. (2010). Applications of Photocatalytic Disinfection. *International Journal of Photoenergy*, 2010, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2010/764870>
- Ganguly, P., Byrne, C., Breena, A., & Pillai, S. (2018). Antimicrobial activity of photocatalysts: Fundamentals, mechanisms, kinetics and recent advances *Applied Catalysis B: Environmental* 225 (2018) 51–75. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.018>

- García Fresnadillo, D. (2010). Generación Fotosensibilizada de Oxígeno Singlete. *Revista Científica TECNIA*, 20(1), 5. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v20i1.104>
- García-Fresnadillo, D. (2018). Singlet oxygen photosensitizing materials for Point-of-Use water disinfection with solar reactors. *ChemPhotoChem*, 2(7), 512-534. <https://doi.org/10.1002/cptc.201800062>
- Gerba, C. P., & Pepper, I. L. (2019). Drinking water treatment. En Elsevier eBooks (pp. 435-454). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00024-0>
- Giannakis, S., López, M. I. P., Spuhler, D., Pérez, J. S., Ibáñez, P. F., & Pulgarin, C. (2016). Solar disinfection is an augmentable, in situ -generated Photo-Fenton Reaction-Part 1: A review of the mechanisms and the fundamental aspects of the process. *Applied Catalysis B-environmental*, 199, 199-223. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.06.009>
- Gil, M. I., Selma, M. V., López-Gálvez, F., & Allende, A. (2009). Fresh-cut product sanitation and wash water disinfection: Problems and solutions. *International Journal of Food Microbiology*, 134(1-2), 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.05.021>
- Giraldo, L. F. G., Franco, E. A. M., & Arango, J. J. S. (2004). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de investigación*, 1(1), 83-92. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511013>
- Glaze, W. H. (1987). Drinking-water treatment with ozone. *Environmental Science & Technology*, 21(3), 224-230. <https://doi.org/10.1021/es00157a001>
- Glicker, J. L., & Edwards, R. (1991). Giardiasis risk from an unfiltered, protected surface water source. *Journal American Water Works Association*, 83(11), 46-51. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1991.tb07248.x>

Gómez-Couso, H., Fontán-Sainz, M., McGuigan, K. G., & Ares-Mazás, E. (2009). Effect of the radiation intensity, water turbidity and exposure time on the survival of cryptosporidium during simulated solar disinfection of drinking water. *Acta Tropica*, 112(1), 43-48.

<https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2009.06.004>

Gómez Fajardo, D. M. (2012). *Evaluación de la eficiencia del proceso foto-fenton homogéneo a escala piloto en la inactivación de microorganismos presentes en aguas utilizando bajas concentraciones de hierro y pH cercano al neutro* [Tesis]. Universidad del Valle.

Disponible en:

<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/723d454d-5dc0-4a83-92b9-6ba3c7570d50/content>

Guillard, C., Bui, T., Felix, C., Moules, V., Lina, B., & Lejeune, P. (2008). Microbiological disinfection of water and air by photocatalysis. *Comptes Rendus Chimie*, 11(1-2), 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2007.06.007>

Guo, M., Hu, H., Bolton, J. R., & El-Din, M. G. (2009). Comparison of low- and medium-pressure ultraviolet lamps: Photoreactivation of *Escherichia coli* and total coliforms in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants. *Water Research*, 43(3), 815-821. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.028>

Ha, J., & Kang, D. (2018). Effect of intermittent 222 nm krypton-chlorine excilamp irradiation on microbial inactivation in water. *Food Control*, 90, 146-151.

<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.02.025>

Heraeus Group. (s. f.). <https://www.heraeus.com/en/group/home/home.html>

- Jemli, M., Alouini, Z., Sabbahi, S., & Gueddari, M. (2002). Destruction of fecal bacteria in wastewater by three photosensitizers. *Journal of Environmental Monitoring*, 4(4), 511-516. <https://doi.org/10.1039/b204637g>
- Jiménez Hernández, E. (2010). Desinfección de Aguas Mediante Oxígeno Singlete. *Revista Científica TECNIA*, 20(2), 15. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v20i2.101>
- Kim, T., Kim, H., Cho, J., Kim, H., Seo, J., Lee, J., Choi, J., & Lee, C. H. (2019). Inactivation of *Escherichia coli* and MS2 coliphage via singlet oxygen generated by homogeneous photosensitization. *Korean Journal of Chemical Engineering*.
<https://doi.org/10.1007/s11814-019-0353-4>
- Kohantorabi, M., Giannakis, S., Feng, L., & Pulgarin, C. (2019). A systematic investigation on the bactericidal transient species generated by photosensitization of natural organic matter (NOM) during solar and Photo-Fenton disinfection of surface waters. *Applied Catalysis B-environmental*, 244, 983-995. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.12.012>
- Kokkinos, P., Venieri, D., & Mantzavinos, D. (2021). Advanced oxidation processes for water and wastewater viral disinfection. A systematic review. *Food and Environmental Virology*, 13(3), 283-302. <https://doi.org/10.1007/s12560-021-09481-1>
- Kolb, D. (1979). The pH concept. *Journal of Chemical Education*, 56(1), 49.
<https://doi.org/10.1021/ed056p49>
- Kostoff RN, Solka JL, Rushenberg RL, Wyatt JA. (2008). Literature-related discovery (LRD): Water purification. *Technological Forecasting & Social Change* 75 (2008) 256–275. doi: 10.1016/j.techfore.2007.11.009

- Kuznetsova, N. A., Makarov, D., Kaliya, O. L., & Vorozhtsov, G. N. (2007). Photosensitized oxidation by dioxygen as the base for drinking water disinfection. *Journal of Hazardous Materials*, 146(3), 487-491. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.064>
- Larson, R. A., & Marley, K. A. (1999). Singlet Oxygen in the Environment. *The Handbook of Environmental Chemistry Vol. 2 Part L. Environmental Photochemistry*. ed. by P. Boule.
- Lechevallier, M.W., Evans, T.M., & Seidler, R.J. (1981). Effect of turbidity on chlorination efficiency and bacterial persistence in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology*, 42, 159 - 167.
- Li, Y., Zhang, C., Shuai, D., Naraginti, S., Wang, D., & Zhang, W. (2016). Visible-light-driven photocatalytic inactivation of MS2 by metal-free G-C3N4: Virucidal performance and Mechanism. *Water Research*, 106, 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.009>
- Li, Q., & Li, F. (2021b). Recent advances in molecular oxygen activation via photocatalysis and its application in oxidation reactions. *Chemical Engineering Journal*, 421, 129915. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129915>
- Lindenauer, K. G., & Darby, J. L. (1994). Ultraviolet disinfection of wastewater: Effect of dose on subsequent photoreactivation. *Water Research*, 28(4), 805-817. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90087-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90087-6)
- Macedo-Márquez, A., (2012). La Producción de Especies Reactivas de Oxígeno (EROS) en las Mitocondrias de *Saccharomyces cerevisiae*. *TIP Rev.Esp.Cienc.Quím.Biol.* Vol. 15, No. 2. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/revespciequibio/cqb-2012/cqb122c.pdf>

- Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M., Blanco, J., & Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. *Catalysis Today*, 147(1), 1-59. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018>
- Matafonova, G., & Batoev, V. (2012). Recent progress on application of UV excilamps for degradation of organic pollutants and microbial inactivation. *Chemosphere*, 89(6), 637-647. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.012>
- McCoy, W.F., & Olson, B.H. (1986). Relationship among turbidity, particle counts and bacteriological quality within water distribution lines. *Water Research*, 20, 1023-1029.
- Olmedo Sánchez, M. (2008). Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud. Recuperado 29 octubre, 2019, de [http://salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc51018bc59c356_Hig.Sanid.Ambient.8.335-342\(2008\).pdf](http://salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc51018bc59c356_Hig.Sanid.Ambient.8.335-342(2008).pdf)
- Melián, J. H., Doña-Rodríguez, J., Suárez, A. S. S., Rendón, E. T., Campo, C. V. D., Araña, J., & Peña, J. P. (2000). The photocatalytic disinfection of urban waste waters. *Chemosphere*, 41(3), 323-327. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(99\)00502-0](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(99)00502-0)
- Meyer, E. A., Glicker, J., Bingham, A. K., & Edwards, R. (1989). Inactivation of *Giardia muris* cysts by chloramines. *Journal of The American Water Resources Association*, 25(2), 335-340. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1989.tb03069.x>
- Mostafa, S., & Rosario-Ortiz, F. (2013). Singlet Oxygen Formation from Wastewater Organic Matter. *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society. 2013, 47, 8179–8186

- Mosteo, R., López, A. V., Muzard, D., Benítez, N., Giannakis, S., & Pulgarin, C. (2020). Visible light plays a significant role during bacterial inactivation by the photo-fenton process, even at sub-critical light intensities. *Water Research*, 174, 115636.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115636>
- Nelson, K. L., Boehm, A. B., Davies-Colley, R. J., Dodd, M. C., Kohn, T., Linden, K. G., Liu, Y., Maraccini, P. A., McNeill, K., Mitch, W. A., Nguyen, T. H., Parker, K. M., Rodriguez, R., Sassoubre, L. M., Silverman, A. I., Wigginton, K., & Zepp, R. G. (2018). Sunlight-mediated inactivation of health-relevant microorganisms in water: A review of mechanisms and modeling Approaches. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(8), 1089-1122. <https://doi.org/10.1039/c8em00047f>
- Olmedo Sánchez, M. T. (2008). Subproductos de la desinfección del agua por el empleo de compuestos de cloro. Efectos sobre la salud. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 8, 335-342.
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OLMEDO%202008.%20Subp%20ductos%20de%20la%20desinfecci%C3%B3n%20del%20agua.pdf
- Omarova, A., Tussupova, K., Berndtsson, R., Kalishev, M & Sharapatova, K. (2018). Protozoan Parasites in Drinking Water: A System Approach for Improved Water, Sanitation and Hygiene in Developing Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018,15, 495; doi:10.3390/ijerph15030495.
- Ossola, R., Jönsson, O. M., Moor, K. J., & McNeill, K. (2021). Singlet oxygen quantum yields in environmental waters. *Chemical Reviews*, 121(7), 4100-4146.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00781>
- Paleologou, A., Marakas, H., Xekoukoulotakis, N., Moya, A., Vergara, Y., & Kalogerakis, N. et al. (2007). Disinfection of water and wastewater by TiO₂ photocatalysis, sonolysis and

- UV-C irradiation. Fecha de acceso: 14 julio 2019, Disponible en:
https://www.academia.edu/7286769/Disinfection_of_water_and_wastewater_by_TiO2_photocatalysis_sonolysis_and_UV-C_irradiation; doi: 10.1016/j.cattod.2007.06.059
- Pibiri, I., Buscemi, S., & Pace, A. (2018). Photochemically Produced singlet Oxygen: Applications and Perspectives. *ChemPhotoChem*, 2(7), 535-547.
<https://doi.org/10.1002/cptc.201800076>
- Pichel, N., Vivar, M., & Fuentes, M. (2019). The Problem of Drinking Water Access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. *Chemosphere*, 218, 1014-1030. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.205>
- Potosí Rodríguez, S. (2016). *Evaluación del efecto bactericida del proceso foto-fenton homogéneo en aguas empleando bajas concentraciones de hierro y pH cercano al neutro* [Tesis de Maestría]. Universidad del Valle. Disponible en:
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/142a5084-a6b6-4349-ae3f-49c9f7584e15/content>
- Pozo Soto, R. (2009). *Métodos de Desinfección para la Potabilización del Agua* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Fecha de acceso: 3 septiembre 2019, Disponible en:
http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/4198/1/pozo_sr.pdf
- Prasad, A., Du, L., Zubair, M., Subedi, S., Ullah, A., & Roopesh, M.S. (2020). Applications of Light-Emitting Diodes (LEDs) in Food Processing and Water Treatment Food Engineering Reviews. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09221-4>
- Pujol-Lereis, L. M., Bochicchio, P. A., & Rabossi, A. (2011). Xantenos y porfirinas, moléculas fotoactivables empleadas en el control de insectos plaga. *Química Viva*, 10(3), 139-153.

- Ramírez Quirós, F. (2005). *Tratamiento de desinfección del agua potable*. Editorial Canal Educa, Madrid.
- Reinhard, C. T., Planavsky, N. J., Olson, S. L., Lyons, T. W., & Erwin, D. H. (2016). Earth's oxygen cycle and the evolution of animal life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(32), 8933–8938. doi:10.1073/pnas.1521544113
- Ríos-Tobón, S., Agudelo-Cadavid, R. M., & Gutiérrez-Builes, L. A. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(2), 236–247.
<https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08>
- Ripolles-Avila, C., Martínez-García, M., Hascoët, A., & Jerez, J. J. R. (2019). Bactericidal efficacy of UV activated TiO₂ nanoparticles against gram-positive and gram-negative bacteria on suspension. *Cyta-journal of Food*, 17(1), 408-418.
<https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1590461>
- Rodríguez-Miranda, J. P., García-Ubaque, C. A., & García-Ubaque, J. C. (2017). Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18(5), 738. <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n5.54869>
- Sánchez, I., Carra, I., & Pérez, J. (2013). El uso sostenible del agua: tributos medioambientales y nuevos procesos de descontaminación mediante energías renovables. Fecha de acceso: 14 Julio 2019, Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4223677>
- Simpson, K. L., & Hayes, K. P. (1998). Drinking water disinfection by-products: An Australian perspective. *Water Research*, 32(5), 1522–1528. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(97\)00341-2](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(97)00341-2)

- Singer, P. C. (1990). Assessing ozonation research needs in water treatment. *Journal American Water Works Association*, 82(10), 78-88. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1990.tb07040.x>
- Solsona, F., Méndez, J. P. (2002). *Desinfección del Agua*. Au. Institucional CEPIS; OPS; OMS; EPA, Lima, CEPIS.
- Sommer, R., Haider, T., Cabaj, A., Pribil, W., & Lhotsky, M. (1998). Time dose reciprocity in UV disinfection of water. *Water Science and Technology*, 38(12).
[https://doi.org/10.1016/s0273-1223\(98\)00816-6](https://doi.org/10.1016/s0273-1223(98)00816-6)
- Spesia, M. B., Milanesio, M. E., Durantini, E. N. (2008). “Synthesis, Properties and Photodynamic Inactivation of Escherichia coli by Novel Cationic Fullerene C60 Derivatives”, *Eur. J. Med. Chem.*, 2008, 43, 853–861.
- Thandu, M., Comuzzi, C & Goi, D. (2015). Phototreatment of Water by Organic Photosensitizers and Comparison with Inorganic Semiconductors. *International Journal of Photoenergy*. Hindawi Publishing Corporation. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/521367>
- Valkov, A., Raik, K., Mualem-Sinai, Y., Nakonechny, F., & Nisnevitch, M. (2018). Water Disinfection by Immobilized Photosensitizers. *Water*, 11(1), 26.
<https://doi.org/10.3390/w11010026>
- Van Der Westhuizen, D., Von Eschwege, K. G., & Conradie, J. (2019). Electrochemical data of polypyridine complexes of Ru(II). *Data In Brief*, 27, 104759. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104759>
- Wang, D., Oppenländer, T., El-Din, M. G., & Bolton, J. R. (2010). Comparison of the Disinfection Effects of Vacuum-UV (VUV) and UV Light on *Bacillus subtilis* Spores in

- Aqueous Suspensions at 172, 222 and 254 nm. *Photochemistry and Photobiology*, 86(1), 176-181. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2009.00640.x>
- Wang, L., Xiao, K., & Zhao, H. (2023). The debatable role of singlet oxygen in persulfate-based advanced oxidation processes. *Water Research*, 235, 119925. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119925>
- Wang, Y., Lin, Y., He, S., Wu, S., & Yang, C. (2024). Singlet Oxygen: Properties, generation, detection, and environmental applications. *Journal of Hazardous Materials*, 461, 132538. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132538>
- Wigginton, K., Menin, L., Montoya, J. P., & Kohn, T. (2010). Oxidation of virus proteins during UV254 and singlet oxygen mediated inactivation. *Environmental Science & Technology*, 44(14), 5437-5443. <https://doi.org/10.1021/es100435a>
- World Health Organization. (2017). Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water.
- World Health Organization. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda. Ginebra: Organización Mundial de la Salud; 2018. Disponible en: <http://apps.who.int/iris>
- You, J., Guo, Y., Guo, R., & Liu, X. (2019). A review of visible light-active photocatalysts for water disinfection: Features and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 373, 624-641. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.071>
- Zhang, C., Li, Y., Shuai, D., Zhang, W., Niu, L., Wang, L., & Zhang, H. (2018). Visible-light-driven, water-surface-floating antimicrobials developed from graphitic carbon nitride and expanded Perlite for water disinfection. *Chemosphere*, 208, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.163>

Zheng, X., Shen, Z., Cheng, C., Shi, L., Cheng, R., & Yuan, D.H. (2018). Photocatalytic disinfection performance in virus and virus/bacteria system by Cu-TiO₂ nanofibers under visible light. *Environmental Pollution* 237 (2018) 452-459.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.074>

Apéndices

Apéndice A

Matriz de Evaluación de Artículos Científicos

N°	Título	Identificador de Objetos Digitales (DOI)	Fundamento	Metodología	Criterios de investigación y recopilación de información	Conclusiones
1	Bench-scale evaluation of water disinfection by visible-to-UVC up conversion under high-intensity irradiation	http://dx.doi.org/10.1016/j.jphoto.2015.10.021	El objetivo de esta investigación es analizar el posible uso de la cerámica de conversión ascendente (UC) en aplicaciones antimicrobianas. Se busca determinar si estas cerámicas pueden generar radiación ultravioleta C (UVC) cuando son expuestas a la luz, y si esta radiación es efectiva para eliminar bacterias. El estudio investiga las propiedades del material y la eficiencia de la cerámica UC, además de examinar el uso de luz solar concentrada como fuente de excitación.	En este estudio de investigación se utilizaron experimentos para evaluar el potencial de la luminiscencia de conversión ascendente (UC) en la desinfección solar del agua. Se emplearon dos tipos de materiales cerámicos, uno dopado con iones Pr ³⁺ y otro sin dopar, para estudiar su eficacia en la inactivación de la bacteria <i>Escherichia coli</i> . Se utilizaron un rayo láser y luz solar concentrada para excitar la cerámica UC, y se midió la intensidad de ambos. Se prepararon muestras de <i>Escherichia coli</i> en caldo nutritivo y se diluyeron en solución salina tamponada con fosfato. Las muestras cerámicas se expusieron a las bacterias y se irradiaron con el rayo láser o la luz solar durante un tiempo determinado. Después de la irradiación, se contaron las unidades formadoras de colonias para evaluar la eficacia de la cerámica UC en la inactivación de las bacterias.	En los experimentos de inactivación por excitación láser, se utilizó un reactor con una ventana de cuarzo para irradiar los gránulos cerámicos UC y de control con un láser de argón. Para medir la inactivación de las bacterias, se tomaron muestras de la suspensión bacteriana y se diluyeron con PBS. Las muestras diluidas se mantuvieron en la oscuridad antes de realizar ensayos en placa para medir el crecimiento bacteriano. En los experimentos de inactivación con luz solar concentrada, las cerámicas UC se expusieron a la luz solar concentrada utilizando un dispositivo que enfocaba la luz sobre las cerámicas. Se controló la intensidad de la luz solar y la temperatura de la suspensión durante la exposición. La caracterización de las cerámicas UC se realizó utilizando un láser de argón para obtener el espectro de emisión UC. La fotoluminiscencia UV emitida se midió utilizando un sistema de detección y la UVC emitida se cuantificó	Se descubrió que el material cerámico UC dopado con ion praseodimio mostraba actividad antimicrobiana cuando se exponía a excitación láser. El material era capaz de convertir la luz infrarroja cercana en luz ultravioleta C, que tiene propiedades germicidas. Se demostró que el material UC inactivaba la bacteria <i>Escherichia coli</i> cuando se exponía a la luz láser o a luz solar concentrada. Sin embargo, la eficacia de la conversión de luz en UVC era baja y se requiere continuar investigando para mejorar su eficacia en aplicaciones prácticas.

					utilizando un radiómetro equipado con un detector de UVC germicida.	
2	Transparent Glass with the Growth of Pyramid-Type MoS ₂ for Highly Efficient Water Disinfection under Visible-Light Irradiation	10.1021/acsami.8b06656	El estudio se centra en el efecto de desinfección fotocatalítica de un vidrio piramidal llamado MoS ₂ @Ag cuando se expone a luz visible. El estudio incluye la síntesis y caracterización de este vidrio piramidal y evalúa su capacidad para inactivar la bacteria Escherichia coli (Escherichia coli). Además, se investiga cómo funciona el proceso de inactivación bacteriana y el papel de las especies reactivas del oxígeno (ROS) en este proceso y se compara la eficacia desinfectante del vidrio piramidal MoS ₂ @Ag con la de otros materiales fotocatalíticos.	La investigación utiliza síntesis y caracterización de fotocatalizadores MoS ₂ piramidales y realiza varios experimentos y análisis, como curvas de calentamiento, espectros in situ, imágenes SEM, patrones XRD, recuperación de Escherichia coli, espectros XPS, imágenes OM, mapeo Raman y ensayos cíclicos para evaluar su eficacia en la desinfección.	La investigación aborda la desinfección del agua utilizando fotocatalizadores como el vidrio MoS ₂ @Ag, que responde a la luz visible. Esto puede ser una solución eficaz y asequible para países en desarrollo y áreas afectadas por desastres. La desinfección fotocatalítica con luz visible es accesible y se investiga su mecanismo mediante espectroscopia Raman.	La investigación concluye que el vidrio piramidal MoS ₂ @Ag es altamente efectivo y amigable con el medio ambiente para desinfectar agua mediante luz visible. Este material eliminó más del 99,99% de Escherichia coli en solo 40 minutos bajo luz visible simulada. Además, su consumo de material por unidad de volumen de solución reactiva fue el más bajo en comparación con otros datos conocidos, lo que lo hace prometedor para la desinfección del agua en países en desarrollo o áreas afectadas por desastres naturales o conflictos. Se determinó el mecanismo de desinfección fotocatalítica utilizando espectro Raman en tiempo real para detectar la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS).

3	Distance-Dependent Plasmon-Enhanced Singlet Oxygen Production and Emission for Bacterial Inactivation	10.1021/jacs.5b12704	El estudio trata sobre la síntesis de nanopartículas híbridas de plata-sílice con rosa de bengala en su superficie. Estas nanopartículas tienen un núcleo de plata de 67 nm y una capa de sílice de 5 a 100 nm. Estas partículas mejoran la producción y emisión de oxígeno singlete ($^1\text{O}_2$) debido a su estructura plasmónica. La proximidad a la nanoestructura plasmónica afecta tanto la producción como la emisión de $^1\text{O}_2$ in vitro.	La investigación sintetizó nanopartículas plasmónicas híbridas utilizando la técnica Stöber con diferentes concentraciones de TEOS. Luego, se caracterizaron con TEM y espectroscopía UV-Vis, y se midió la absorción de la Rosa de Bengala durante la síntesis. Se evaluó la producción y emisión de $^1\text{O}_2$ in vitro con espectroscopía de emisión de fosforescencia y se probó la actividad antibacteriana con técnicas microbiológicas.	Se recopilaron datos mediante experimentos precisos para medir la producción de $^1\text{O}_2$ y la fluorescencia de la Rosa de Bengala con las nanopartículas plasmónicas. Estos datos se analizaron y se ajustaron a un modelo matemático para obtener parámetros cinéticos. También se realizaron análisis estadísticos para evaluar la significancia de los resultados.	Los resultados indican que con nanoestructuras plasmónicas cuidadosamente diseñadas que combinan una nanopartícula metálica y un fotosensibilizador de $^1\text{O}_2$ a distancias específicas, se puede controlar la producción, la actividad antibacteriana y la detección de $^1\text{O}_2$ en medios biológicos. Además, sugiere un gran potencial de estas nanopartículas para aplicaciones de diagnóstico y tratamiento combinado, conocidas como teranósticas.
4	Selective Inactivation of Resistant Gram-Positive Pathogens with a Light-Driven Hybrid Nanomaterial	10.1021/acsami.5b06742	El fundamento de la investigación es presentar un método simple y efectivo para dispersar fotosensibilizadores hidrofóbicos en agua utilizando una arcilla en capas. El nanomaterial híbrido resultante puede fotoinactivar selectivamente patógenos Gram-positivos mientras es inofensivo para las células eucariotas.	La investigación implica dispersar un fotosensibilizador en agua con arcilla, caracterizar el nanomaterial resultante, evaluar la citotoxicidad en células humanas y probar su capacidad para inactivar bacterias Grampositivas, específicamente <i>S. aureus</i> 6850.	Varias técnicas de caracterización utilizadas para evaluar el nanomaterial híbrido resultante, como la espectroscopía de absorción y emisión, la microscopía electrónica de transmisión y la difracción de rayos X. Además, se menciona que se realizaron ensayos de citotoxicidad y ensayos de inactivación fotodinámica para evaluar la capacidad del	El nanomaterial desarrollado en el estudio es eficaz para inactivar patógenos en terapia fotodinámica y puede usarse en recubrimientos auto-desinfectantes. Solubiliza fotosensibilizadores en agua, inactiva selectivamente bacterias Gram-

					nanomaterial para inactivar patógenos Gram-positivos.	positivas y es seguro para células humanas.
5	Employing bacterial mutations for the elucidation of photo-Fenton disinfection: Focus on the intracellular and extracellular inactivation mechanisms induced by UVA and H ₂ O ₂	https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116049	El estudio investiga la cinética de degradación de células bacterianas durante la desinfección, centrándose en los efectos de H ₂ O ₂ y otros factores en la oxidación de la membrana y la peroxidación lipídica. Se analiza la acumulación de MDA como indicador de la peroxidación. El objetivo es comprender los mecanismos y la cinética de la inactivación bacteriana en los procesos de desinfección.	El estudio utilizó reactivos de alta pureza y cepas de Escherichia coli en condiciones específicas. Se analizó la cinética de degradación de células intactas y lisadas tras el tratamiento con H ₂ O ₂ . Se midió la peroxidación lipídica mediante la acumulación de MDA utilizando cromatografía líquida de alto rendimiento. El objetivo fue entender la cinética de inactivación bacteriana en los procesos de desinfección.	Se utilizaron varios métodos y técnicas, como los procesos de Fenton y de H ₂ O ₂ único, mediciones con oxisulfato de titanio (IV) y orto-nitrofenil-β-D-galactopiranosido, y métodos microbianos con cepas de Escherichia coli. También menciona el uso de centrifugación, catalasa y cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC) para el análisis.	En la oscuridad, el peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) actúa en la oxidación externa bacteriana, mientras que la penetración intracelular del H ₂ O ₂ desencadena una oxidación interna más lenta. La exposición a rayos UVA y UVA+H ₂ O ₂ resulta en una menor acumulación de MDA, sugiriendo una inactivación bacteriana más efectiva a nivel intracelular. Las tasas de ONPG, un indicador de permeabilidad, muestran un aumento constante bajo H ₂ O ₂ en la oscuridad y un pico bajo UVA y UVA+H ₂ O ₂ , respaldando la inactivación intracelular.
6	Edible Dye-Enhanced Solar Disinfection with Safety Indication	10.1021/acs.est.8b03866	La investigación busca abordar la falta de acceso al agua potable global, especialmente en países de bajos ingresos, mediante la evaluación de métodos de desinfección solar. El objetivo es ofrecer una solución sostenible para	La metodología del estudio incluyó la cuantificación de ácidos grasos libres (FFA), el bacteriófago MS2 y el fotoblanqueo. Se usó un cromatógrafo para medir FFA, el método de placa de agar estándar para el bacteriófago MS2 y espectroscopía UV-vis para el	Se recopilaron datos de concentración de AGL con un cromatógrafo, se analizaron muestras de bacteriófagos MS2 mediante placas de agar, y se midió el fotoblanqueo con espectroscopía UV-vis. Se calcularon mapas de tiempo	La desinfección solar del agua (SODIS) es un método económico y efectivo para mejorar la calidad del agua y prevenir enfermedades en países en desarrollo. Consiste en exponer el agua a la luz solar en

			<p>mejorar la calidad del agua y prevenir enfermedades transmitidas por agua, alineándose con los objetivos de desarrollo de la ONU que destacan la importancia del acceso al agua potable y saneamiento para la salud y el bienestar.</p>	<p>foto Blanqueo. Se calcularon mapas de tratamiento para inactivar el 99,99% del bacteriófago MS2 con eritrosina o riboflavina, utilizando datos meteorológicos de la NASA.</p>	<p>de tratamiento usando datos de irradiación solar de la NASA y se trazaron con R Statistical Computing Software.</p>	<p>botellas transparentes, lo que inactiva virus y bacterias. La eficacia de SODIS depende de la claridad del agua, el tiempo de exposición y la intensidad solar. El oxígeno singlete generado durante SODIS juega un papel clave en la inactivación de virus. SODIS es eficaz contra varios tipos de virus y se ha demostrado ser rentable en estudios, lo que lo hace una opción viable en lugares con recursos limitados.</p>
7	<p>Fe and Cu in humic acid extracts modify bacterial inactivation pathways during solar disinfection and photo-Fenton processes in water</p>	<p>https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.04.062</p>	<p>La investigación se centra en cómo los metales en los extractos de ácido húmico (HAs) pueden influir en la eficacia de la desinfección solar y foto-Fenton en agua. Se llevaron a cabo experimentos para evaluar cómo la adición de H₂O₂ y Fe afecta la inactivación de Escherichia coli. El objetivo es encontrar nuevas formas de desinfección utilizando HAs con metales y demostrar su eficacia en la reducción de microorganismos y la eliminación del aditivo.</p>	<p>Se llevó a cabo un experimento para evaluar cómo la presencia de metales en extractos de ácido húmico afecta la eficacia de los procesos de desinfección solar y foto-Fenton en agua. Se utilizaron tres extractos de ácido húmico con diferentes cantidades de materia mineral. Se realizaron experimentos para examinar los efectos de agregar H₂O₂ y Fe en la eliminación de Escherichia coli. Se llevaron a cabo estudios detallados para investigar las variables relacionadas con los extractos de ácido húmico, como la concentración y composición. Los experimentos se realizaron</p>	<p>Se realizaron experimentos con repeticiones biológicas y estadísticas. Se usaron diluciones para obtener una concentración deseada de colonias por placa. Los datos representan el promedio con desviación estándar. Se utilizaron un simulador solar y estudios detallados para investigar variables, como la concentración y composición de los extractos de ácido húmico. Los datos se analizaron estadísticamente para evaluar las diferencias entre los grupos de tratamiento.</p>	<p>La presencia de metales en los extractos de ácido húmico puede afectar la eficacia de los procesos de desinfección solar y foto-Fenton en agua. La adición de HAs con metales puede mejorar la eficacia, pero también producir subproductos tóxicos. Se requieren más estudios para comprender y optimizar estos procesos de desinfección asistidos por HAs con metales.</p>

				en un entorno de laboratorio estándar.		
8	Efficient Photocatalytic Removal of Methylene Blue Using a Metalloporphyrin-Poly(vinylidene fluoride) Hybrid Membrane in a Flow-Through Reactor	10.1021/acsami.9b04601	El objetivo principal de la investigación es desarrollar un material híbrido de membrana fotocatalítica usando una membrana de microfiltración de politetrafluoroetileno con poros de tamaño 0.2 μm y un fotosensibilizador (5,10,15,20-tetrakis (pentafluorofenil)-21H,23H-porfina paladio (II) (PdTFPP)) para la generación de oxígeno singlete ($^1\text{O}_2$) con aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales.	La investigación implica modificar una membrana de microfiltración con el fotosensibilizador PdTFPP para generar oxígeno singlete y luego estudiar su capacidad fotocatalítica. Se evaluó la degradación fotocatalítica del azul de metileno en un reactor de membrana de flujo continuo. Se busca responder preguntas sobre cómo fabricar una membrana fotocatalítica, los mecanismos de interacción con el oxígeno y los contaminantes, y el mejor rendimiento en la degradación del contaminante al variar los parámetros del sistema.	Los datos se recopilaron a través de varios experimentos. Se modificó una membrana de microfiltración PVDF con PdTFPP y se midió su permeabilidad con agua Milli-Q. Se utilizaron espectrofotómetro y monochromator para medir absorción y luminiscencia. La interacción de la membrana con el agua se midió con espectroscopía de reflectancia ATR. La potencial zeta de la membrana se midió con un analizador electrocinético. Se utilizó ToF-SIMS para espectroscopía de masas. Las pruebas de fotodegradación se realizaron en un flujo cerrado. Se midió la concentración de oxígeno y la presión transmembrana con un medidor multiparámetro y se registraron con LabVIEW 2014.	La investigación concluye que la membrana de microfiltración PVDF modificada con PdTFPP es prometedora para la eliminación fotocatalítica de contaminantes en el tratamiento de agua. La membrana muestra buena permeabilidad y estabilidad en la degradación fotocatalítica bajo luz verde en un flujo único durante 90 horas. La modificación con PdTFPP permite generar oxígeno singlete ($^1\text{O}_2$) para mejorar la eliminación de contaminantes. También se proporcionan detalles sobre la síntesis, caracterización y mecanismo de interacción de la membrana con agua y contaminantes.
9	Hybrid Silver Nanocubes for Improved Plasmon-Enhanced Singlet Oxygen Production	10.1021/jacs.8b12206	El fundamento de esta investigación es la creación de plataformas nanoplasmonicas que mejoren la producción de	Los autores describen cómo sintetizar nanocubos de plata y esferas de plata sílice-revestida decorados con rosa bengala (RB). Utilizaron una solución	Los autores describen cómo sintetizar nanocubos y esferas de plata con recubrimiento de sílice y rosa bengala. Utilizaron una solución	La investigación introduce nanopartículas híbridas de plata que mejoran drásticamente la

	and Inactivation of Bacteria		<p>oxígeno singlete y la inactivación de bacterias. Los nanocubos de plata y las esferas de plata con sílice revestida de rosa bengala (RB), en presencia de luz, lideran estos logros frente a otros métodos, como los utilizados en nanoplataformas basadas en oro.</p>	<p>precursora con ácido etilenglicol, tetraetilortosilicato y un surfactante. La síntesis se hizo mediante la reacción de poliol de Xia con modificaciones leves. Luego, caracterizaron los nanocristales con microscopía electrónica de transmisión (TEM) y espectroscopía UV-visible. También realizaron experimentos para medir la producción de oxígeno singlete y la inactivación de bacterias.</p>	<p>precursora con ácido etilenglicol, tetraetilortosilicato y un surfactante. La síntesis se realizó mediante la reacción de poliol de Xia con pequeñas modificaciones. Luego, caracterizaron los nanocristales con microscopía electrónica de transmisión y espectroscopía UV-visible. También llevaron a cabo experimentos para medir la producción de oxígeno singlete y la inactivación de bacterias.</p>	<p>producción de oxígeno singlete (1O_2) y la inactivación de bacterias. Sintetizaron nanocristales de plata y esferas de plata sílice-revestida con rosa bengala (RB) y midieron la producción de 1O_2 a diferentes espesores de la capa de sílice. Estas nanopartículas ofrecen una mejora 1O_2 máxima aproximadamente 12 veces mayor, siendo una de las mayores mejoras reportadas. Además, son altamente efectivas para inactivar bacterias en pruebas in vitro en menos de 30 minutos de exposición a la luz visible. Estas nanopartículas tienen un gran potencial en terapia fotodinámica y biotecnología.</p>
10	Assessment of a pilot solar V-trough reactor for solar water disinfection	https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125719	<p>El fundamento de la investigación es desarrollar un nuevo diseño de reactor solar V-trough para la desinfección de agua, que sea más eficiente que los reactores solares convencionales y que pueda inactivar simultáneamente varias bacterias comunes en</p>	<p>El estudio describe una metodología que evalúa un nuevo diseño de reactor solar V-trough para desinfectar agua. Se examina la eficacia del reactor en inactivar bacterias en diferentes matrices de agua y se evalúa la cantidad de agua que se puede tratar con luz solar natural. El estudio involucra</p>	<p>Se tomaron muestras de agua de 10 mL a intervalos de tiempo predefinidos durante los experimentos de desinfección solar y se analizaron para medir la concentración bacteriana en el agua. También se llevaron a cabo pruebas y monitoreo de bacterias para evaluar la</p>	<p>La conclusión del estudio es que el nuevo diseño de reactor solar V-trough es más eficiente que los reactores solares convencionales para la desinfección de agua y puede inactivar simultáneamente varias</p>

			agua contaminada. El objetivo es proporcionar una solución de bajo costo y sostenible para la desinfección de agua en áreas rurales y en desarrollo.	múltiples pruebas, monitoreo de la concentración bacteriana y cálculo de barras de error para obtener resultados con un nivel de confianza del 95%.	capacidad de tratar agua con luz solar natural. Los datos se sometieron a análisis estadístico y se calcularon barras de error para asegurar un nivel de confianza del 95%.	bacterias comunes en agua contaminada. Además, el reactor solar V-trough es una solución de bajo costo y sostenible para la desinfección de agua en áreas rurales y en desarrollo.
11	Comparing TiO ₂ photocatalysis and UV-C radiation for inactivation and mutant formation of Salmonella typhimurium TA102	10.1007/s11356-016-7981-6	La investigación se centra en la influencia de estrategias de tratamiento en bacterias resistentes a antibióticos y genes de resistencia. Evalúa cómo métodos como la fotocatalisis con TiO ₂ y la radiación UV afectan la inactivación de bacterias y la mutación genética. Además, explora factores que influyen en la presencia de serovares de Salmonella en el ambiente, como condiciones y actividad humana. El estudio busca proporcionar datos sobre la eficacia de diversas estrategias de tratamiento para controlar la contaminación bacteriana y resistencia a antibióticos.	La investigación llevó a cabo experimentos de desinfección utilizando dos métodos: fotocatalisis con TiO ₂ y radiación UV-C. Utilizaron suspensiones de Salmonella typhimurium TA102 a diferentes concentraciones celulares y emplearon un reactor cilíndrico para la fotocatalisis con TiO ₂ y placas Petri para la radiación UV-C. Analizaron los efectos de los tratamientos y la carga bacteriana inicial mediante pruebas estadísticas y análisis de regresión.	El estudio compara la efectividad de dos métodos de desinfección, fotocatalisis de TiO ₂ y radiación UV-C, en la inactivación y prevención de mutantes de Salmonella typhimurium. Esto es importante para combatir la salmonelosis, una causa común de enfermedades transmitidas por alimentos. Los resultados benefician a la salud pública y la industria alimentaria en la elección de métodos de desinfección y fomentan futuras investigaciones en prevención de enfermedades transmitidas por alimentos.	La investigación analizó la inactivación bacteriana mediante fotocatalisis con TiO ₂ y desinfección con UV-C. Encontraron que la tasa de inactivación dependía de la concentración inicial de bacterias y que la liberación de componentes intracelulares durante la fotocatalisis tenía un efecto protector sobre las bacterias vivas. Aunque las conclusiones específicas no se mencionan, el estudio proporciona información sobre los mecanismos y la eficacia de estos métodos para la inactivación bacteriana.
12	Solar Photothermal Disinfection using Broadband-Light	10.1021/acs.est.7b04442	El estudio utiliza nanomateriales fototérmicos como nanotubos de carbono y	La metodología del estudio involucra la síntesis de nanomateriales fototérmicos, su	La inmovilización de nanomateriales fototérmicos en películas delgadas se	La inmovilización de nanomateriales fototérmicos en

	Absorbing Gold Nanoparticles and Carbon Black		nanorods de oro para mejorar la desinfección de agua con luz solar. Se inmovilizan en películas delgadas para dispositivos prácticos y demuestran la capacidad de inactivar bacterias y virus bajo luz solar simulada. El estudio aborda factores como la concentración de nanomateriales y la longitud de onda de la luz.	incorporación en películas delgadas y su uso en la desinfección de agua mediante luz solar simulada. Se realizaron experimentos para evaluar la eficacia y se discutieron factores como la concentración de nanomateriales y la longitud de onda de la luz. También se probaron con diferentes bacterias y virus.	muestra como una estrategia prometedora para la desinfección del agua. Experimentos indican que estas películas pueden inactivar bacterias y virus bajo luz solar simulada. Se discuten factores que afectan la eficiencia, como la concentración de nanomateriales y la longitud de onda de la luz.	películas delgadas es prometedora para desinfectar agua. Se demuestra que estas películas inactivan bacterias y virus con luz solar simulada. Se discuten factores que afectan la eficiencia, como la concentración de nanomateriales y la longitud de onda de la luz.
13	Novel procedure for the numerical simulation of solar water disinfection processes in flow reactors	https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.131	El fundamento del estudio es presentar una metodología integral para la simulación numérica de procesos de desinfección solar de agua en reactores de flujo, que incluye hidrodinámica, transferencia de radiación, transporte de masa y fenómenos de inactivación bacteriana dentro del reactor.	La metodología del estudio consiste en el desarrollo de un modelo de simulación numérica para procesos de desinfección solar de agua en reactores de flujo. El modelo incluye la descripción rigurosa de hidrodinámica, transferencia de radiación, transporte de masa y fenómenos de inactivación bacteriana dentro del reactor mediante el uso de un software de dinámica de fluidos computacional (CFD). Además, se utiliza un modelo cinético mecanicista para la descripción de la tasa de inactivación bacteriana con efectos explícitos de absorción de radiación, acoplado el campo de radiación con los balances de masa de las especies bacterianas viables.	Se realizaron experimentos para validar el modelo de simulación numérica en un reactor tubular acoplado con un colector parabólico compuesto, y que se compararon los resultados experimentales con los resultados de la simulación numérica. Los experimentos se llevaron a cabo en la Universidad Rey Juan Carlos en Madrid, España, en agosto de un año no especificado.	Las conclusiones del estudio son que la metodología presentada es una herramienta útil para la simulación numérica de procesos de desinfección solar de agua en reactores de flujo, y que puede ser utilizada para la escalabilidad del proceso SODIS a sistemas de gran volumen que se instalarán en comunidades remotas donde no hay agua potable disponible. Los resultados de la validación del modelo en un reactor tubular acoplado con un colector parabólico compuesto muestran una buena predicción

						de los datos experimentales bajo luz solar simulada y natural
14	Enhancing solar disinfection of water in PET bottles by optimized in-situ formation of iron oxide films. From heterogeneous to homogeneous action modes with H ₂ O ₂ vs. O ₂ – Part 1: Iron salts as oxide precursors	https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.219	El estudio se enfoca en mejorar la técnica SODIS (Desinfección Solar de Agua), recomendada por la OMS para tratar agua en países en desarrollo. Se investiga la formación de una película de óxido de hierro en botellas de PET y su impacto en la inactivación bacteriana, con el objetivo de reducir el riesgo de re-crecimiento bacteriano en el agua tratada.	Se depositó una película de óxido de hierro en botellas PET utilizando sales de hierro, ajustando varios parámetros. Se investigaron mejoras en la cinética de reacción y la inactivación bacteriana, como la adición de peróxido de hidrógeno y reacciones de photo-Fenton. Se evaluó la eficacia de estas películas para inactivar bacterias mediante conteo microbiano y citometría de flujo. También se utilizaron espectroscopia y microscopia electrónica para evaluar la superficie y la integridad de las películas de óxido de hierro.	La investigación propone una nueva técnica con películas de óxido de hierro en botellas PET para mejorar la desinfección del agua, especialmente relevante en lugares sin acceso a agua potable y saneamiento. Se analizan factores para optimizar el proceso y se investiga el mecanismo de acción. Los resultados pueden beneficiar la salud en regiones con acceso limitado a agua potable.	El estudio concluye que la formación de películas de óxido de hierro en botellas PET usadas en la técnica SODIS mejora la inactivación bacteriana a través de mecanismos como el semiconductor y el lixiviado de hierro controlado. Este proceso es duradero, resistente a la oxidación y eficaz en aguas ligeramente ácidas sin promover el crecimiento bacteriano.
15	Kinetic modeling of lag times during photo-induced inactivation of Escherichia coli in sunlit surface waters: Unraveling the pathways of exogenous action	https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114894	El estudio investiga procesos fotoquímicos en la desinfección de agua solar, destacando especies reactivas como radicales hidroxilo y oxígeno singlete. Examina factores que afectan su producción y su papel en la inactivación de microorganismos. También considera la aplicabilidad del tratamiento solar para abordar la escasez de agua, buscando una comprensión mecanicista de estos procesos y su	Los investigadores llevaron a cabo experimentos para estudiar los procesos fotoquímicos y la desinfección del agua. Emplearon reactivos y sustitutos para simular contaminantes y materia orgánica en el agua. Usaron técnicas analíticas, como HPLC, para medir concentraciones de especies y bacterias. Un programa llamado APEX modeló las reacciones fotoquímicas y predijo tasas de inactivación bacteriana. Los experimentos se realizaron en condiciones controladas con	El estudio se centra en investigar los procesos fotoquímicos que inactivan bacterias, como Escherichia coli, en el agua. Examina el papel de especies reactivas de oxígeno (ROS) como radicales hidroxilo y oxígeno singlete en la desinfección. Las conclusiones tienen implicaciones para mejorar métodos de tratamiento del agua, especialmente la desinfección solar con luz solar para inactivar bacterias en el agua, lo que puede contribuir a estrategias de	Se concluye que la inactivación fotoquímica de bacterias en el agua se debe a la presencia de radicales hidroxilos [HO●] y oxígeno singlete [¹ O ₂]. El tiempo de retardo en el inicio de la inactivación bacteriana puede ser influenciado tanto por HO● como por ¹ O ₂ , especialmente cuando la relación entre ellos es de alrededor de 103. En

			relevancia en el tratamiento del agua.	radiación de longitud de onda constante	tratamiento más eficientes y sostenibles.	aguas naturales expuestas al sol, esta relación suele ser mayor, lo que sugiere que $^1\text{O}_2$ [$\text{HO}\bullet$] afecta más al tiempo de retardo en condiciones naturales. Además, la presencia de materia orgánica, nitrato y nitrito en el agua puede influir en las concentraciones de $\text{HO}\bullet$ y $^1\text{O}_2$, impactando en la inactivación bacteriana. Modelos fotoquímicos ayudaron a evaluar estas condiciones y entender mejor los mecanismos de inactivación, lo que puede contribuir a estrategias más efectivas de tratamiento del agua.
16	Enhanced visible-light-driven photocatalytic inactivation of <i>Escherichia coli</i> using g- $\text{C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ hybrid photocatalyst synthesized using a hydrothermal-calcination approach	10.1016/j.watres.2015.05.053	La base del estudio es la inactivación fotocatalítica de bacterias utilizando esfalerita como fotocatalizador rentable y eficaz bajo luz visible. El estudio analiza el montaje experimental, el proceso de inactivación bacteriana y el papel de las especies reactivas generadas durante el proceso fotocatalítico. También menciona las posibles aplicaciones de este	La metodología del estudio implica la preparación de fotocatalizadores híbridos mediante un método hidrotérmico, combinando nanopartículas de ZnO con NH_4F y tratándolas a diferentes temperaturas. Estos fotocatalizadores se utilizan para la inactivación fotocatalítica de la bacteria <i>Escherichia coli</i> mediante exposición a la luz visible. Se controla la	Los datos del estudio se obtuvieron a través de la preparación de fotocatalizadores mediante un proceso hidrotérmico a diferentes temperaturas y tiempos. Se creó una suspensión bacteriana de <i>Escherichia coli</i> y se añadieron 30 mg de fotocatalizador a la solución resultante. La solución se mantuvo a unos 25°C con	Los investigadores lograron sintetizar un fotocatalizador híbrido g- $\text{C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ mediante una técnica de calcinación hidrotermal sencilla. Este catalizador mostró una mejora significativa en la actividad fotocatalítica al inactivar bacterias cuando se expuso a la

			método fotocatalítico en el tratamiento de aguas y la reutilización de aguas residuales depuradas.	inactivación midiendo el recuento de células viables en intervalos de tiempo y utilizando microscopía electrónica de barrido para observar el proceso de destrucción de las células antes y después de la inactivación.	agitación y equilibrio en la oscuridad antes de la exposición a la luz. Se tomaron muestras a intervalos de tiempo, se sembraron en placas de agar nutriente y se incubaron a 37°C durante 24 horas para contar las células viables. Los datos son promedios de experimentos triplicados. Además, se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar las células de Escherichia coli antes y después de la inactivación. El proceso de preparación de muestras para SEM fue similar a trabajos previos de los investigadores.	luz visible. La mejora se debió a la interacción entre el $\text{g-C}_3\text{N}_4$ y el TiO_2 , lo que aumentó la absorción de luz y la separación eficiente de pares electrón-hueco generados por la luz. Este nuevo fotocatalizador híbrido podría ser útil en la desinfección de agua, especialmente en la purificación de aguas residuales hospitalarias altamente contaminadas con microorganismos patógenos.
17	Mechanistic model of the Escherichia coli inactivation by solar disinfection based on the photo-generation of internal ROS and the photo-inactivation of enzymes: CAT and SOD	http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.093	El fundamento de la investigación presentada en este archivo es el modelo mecanicista de la inactivación de Escherichia coli por desinfección solar, basado en la foto-generación de ROS internos y la foto-inactivación de enzimas CAT y SOD.	El modelo propuesto por los autores se ejecuta resolviendo la ecuación diferencial aplicada al reactor de volumen completo. Esta ecuación diferencial debe resolverse simultáneamente con otras ecuaciones del modelo,	Modelo mecanicista propuesto para la inactivación de Escherichia coli por desinfección solar. El modelo es capaz de reproducir con éxito el perfil temporal de la concentración de bacterias viables en agua clara bajo diferentes irradiancias y diferentes concentraciones bacterianas iniciales, con un error logarítmico medio cuadrático normalizado del 8,32%.	La conclusión principal de la investigación presentada en este archivo es que el modelo mecanicista propuesto es capaz de reproducir con éxito el perfil temporal de la concentración de bacterias viables en agua clara bajo diferentes irradiancias y diferentes concentraciones bacterianas iniciales, con un error logarítmico medio cuadrático normalizado del 8,32%. El modelo

						también es capaz de simular la evolución de ROS intracelulares y enzimas durante la desinfección solar.
18	Solar water disinfection in high-volume containers: Are naturally occurring substances attenuating factors of radiation?	https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125852	El estudio se enfoca en evaluar la efectividad de la desinfección solar del agua en contenedores grandes y cómo las sustancias presentes en el agua afectan la radiación solar. El objetivo principal es mejorar la calidad del agua en regiones con acceso limitado al agua potable.	Los investigadores llevaron a cabo experimentos para evaluar la eficacia de la desinfección solar del agua en contenedores grandes, considerando la presencia de sustancias naturales en el agua. Utilizaron un modelo cinético y propiedades ópticas para predecir la eficacia del proceso bajo condiciones específicas. Se realizaron experimentos con <i>Escherichia coli</i> como microorganismo modelo, midiendo las unidades formadoras de colonias a lo largo del tiempo. Se analizaron parámetros como la irradiancia, la composición del agua y la presencia de sustancias ópticamente activas para entender su efecto en la tasa de desinfección.	Los investigadores realizaron experimentos para evaluar la eficacia de la desinfección solar del agua en recipientes de gran volumen y cómo las sustancias naturales en el agua afectan el proceso. Utilizaron un método de modelización cinética para predecir la eficacia según la irradiancia y la composición del agua. También cuantificaron propiedades ópticas de las sustancias ópticamente activas y simularon la radiación dentro de los contenedores. Los experimentos se hicieron con <i>Escherichia coli</i> y se midió su inactivación en diferentes momentos. Se analizó el efecto de la irradiancia, la composición del agua y sustancias ópticamente activas en la tasa de desinfección.	El estudio concluye que el proceso SODIS es efectivo para desinfectar agua en recipientes grandes, con la tasa de desinfección relacionada a la radiación incidente promedio. Se encontró que sustancias ópticamente activas, como bicarbonatos y ácidos húmicos, pueden influir en la tasa de desinfección al absorber la radiación. Los investigadores desarrollaron un método de modelización para predecir la eficacia del proceso bajo condiciones específicas. Se recomienda considerar el efecto cuantitativo de sustancias como el hierro en futuras predicciones.
19	Visible light plays a significant role during bacterial inactivation by the	https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115636	El estudio investiga el impacto de la luz visible en la inactivación bacteriana a través del proceso de foto-	Los autores llevaron a cabo experimentos para investigar cómo la luz visible afecta la inactivación bacteriana a través	Los autores recolectaron datos utilizando la técnica de recuento de colonias para medir la eficacia de la	Las conclusiones clave del estudio son las siguientes:

	photo-fenton process, even at sub-critical light intensities		fenton, que utiliza luz y un catalizador para degradar contaminantes y eliminar bacterias. Se centra en cómo la intensidad de la luz visible afecta la eficacia del proceso de foto-fenton. Estos hallazgos pueden ser importantes para el tratamiento de aguas residuales y la desinfección del agua, ya que este proceso puede ser una alternativa respetuosa con el medio ambiente a los métodos tradicionales.	del proceso de foto-fenton. Prepararon soluciones de agua con varias concentraciones de peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) y hierro (Fe ²⁺) y las expusieron a diferentes intensidades de luz visible. Luego, midieron la eficacia de la inactivación bacteriana y realizaron análisis espectroscópicos y electroquímicos para entender los mecanismos involucrados. Realizaron experimentos de control y probaron diferentes longitudes de onda de luz visible.	inactivación bacteriana. Sembraron muestras de agua tratada en placas de agar, las incubaron y contaron las colonias bacterianas que crecieron. Utilizaron estos resultados como medida de la eficacia de inactivación. Además, realizaron análisis espectroscópicos y electroquímicos para explorar los mecanismos de reacción en el proceso de foto-fenton, utilizando equipos que miden la absorción de luz y la corriente eléctrica en la solución tratada. Estos análisis proporcionaron información sobre los mecanismos involucrados.	La luz visible mejora significativamente la eficacia del proceso de foto-fenton en la inactivación bacteriana. La eficacia depende de la concentración de H ₂ O ₂ , Fe ²⁺ y la intensidad de la luz visible. La inactivación bacteriana involucra especies reactivas de oxígeno que dañan la membrana celular. La eficacia es mayor con luz visible en lugar de luz ultravioleta (UV). El proceso de foto-fenton puede ser una alternativa efectiva y ecológica en la desinfección del agua y el tratamiento de aguas residuales.
20	Emerging investigators series: the efficacy of chlorine photolysis as an advanced oxidation process for drinking water treatment	10.1039/c6ew00029k	El estudio se enfoca en la fotólisis del cloro como una técnica avanzada para tratar el agua. Resume estudios existentes, describe la química involucrada y su capacidad para eliminar contaminantes y microorganismos. También revisa la alteración de la materia orgánica y la formación de subproductos, y discute factores que afectan su eficacia.	El estudio es una revisión de estudios sobre la fotólisis del cloro en el tratamiento del agua. Comienza con la química involucrada y examina la capacidad del fotólisis del cloro para transformar compuestos orgánicos y eliminar microorganismos. También aborda la alteración de la materia orgánica y la formación de subproductos. Discute factores que afectan la eficacia, como las	El estudio revisa estudios previos sobre la fotólisis del cloro como tratamiento de agua sin detallar los métodos específicos utilizados para recopilar datos. Describe las condiciones y parámetros en algunos estudios, como concentración de cloro, contaminantes orgánicos y duración de la reacción. La información detallada se encuentra en las secciones de	Concluyeron que puede ser eficaz para eliminar ciertos contaminantes orgánicos y microorganismos, pero su eficacia se ve influenciada por factores como la concentración de cloro, la presencia de otros componentes y las condiciones de irradiación. Además, la

				condiciones de irradiación y otros constituyentes del agua.	resultados de los estudios revisados.	formación de subproductos de desinfección durante este proceso es compleja y depende de la materia orgánica presente. Se necesita más investigación para comprender y optimizar el proceso.
21	Assessment of the Roles of Reactive Oxygen Species in the UV and Visible Light Photocatalytic Degradation of Cyanotoxins and Water Taste and Odor Compounds using C-TiO ₂ .	10.1016/j.watres.2015.12.006	El fundamento del estudio es proporcionar información valiosa sobre el papel de las especies reactivas de oxígeno en el proceso fotocatalítico de degradación de cianotoxinas y compuestos de sabor y olor del agua, específicamente utilizando C-TiO ₂ .	El estudio utiliza fotocatalisis para descomponer toxinas como MC-LR, CYN, GSM y MIB. Se emplean dos tipos de fotocatalizadores, Degussa P25 TiO ₂ y Kronos vlp-7000 TiO ₂ , bajo luz visible y UV-A. Se monitorea la degradación de toxinas con técnicas como HPLC-UV, GC-MS y LC-MS/MS y se investiga el papel de especies reactivas, como •OH, ¹ O ₂ , O ₂ •- y H ₂ O ₂ . Además, se registran espectros de fluorescencia y absorbancia. Se utiliza un conjunto experimental con aparatos de fotólisis, medición de potencia, HPLC y otros instrumentos analíticos.	La recogida de datos se llevó a cabo utilizando diversos procedimientos e instrumentos analíticos. Para la degradación de MC-LR y CYN se utilizó HPLC-UV en fase inversa con detección a longitudes de onda específicas. Las concentraciones de GSM y MIB en muestras de agua irradiada se determinaron mediante microextracción en fase sólida en espacio de cabeza (HS-SPME) /cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS). El estudio también menciona el uso de un sistema GC-MS, un sistema LC-MS/MS y un espectrofluorímetro JASCO FP-777 para la adquisición y el análisis de datos. Además, se realizaron experimentos de γ -radiólisis en una cámara gamma.	Se estudió la degradación de las cianotoxinas MC-LR y CYN con fotocatalisis TiO ₂ bajo UV-A y luz visible (VIS). Ambas irradiaciones degradaron las toxinas, siendo VIS más eficaz. Se identificaron productos intermedios por LC-MS/MS, siendo los de dihidroxilación de MC-LR los principales. Bajo UV-A, hubo más isómeros en los productos. También se investigó la degradación de geosmina (GSM) y 2-metilisoborneol (MIB), responsables de olores a tierra/moho, que se degradaron eficazmente con fotocatalisis TiO ₂ bajo UV-A y VIS.

22	Bactericidal efficacy of UV activated TiO ₂ nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria on suspension	10.1080/19476337.2019.1590461	El estudio se centra en la evaluación de la eficacia bactericida de las nanopartículas de TiO ₂ activadas por luz UV contra bacterias Gram-positivas y Gram-negativas en suspensión.	La metodología consistió en evaluar dos tipos de nanopartículas de TiO ₂ , denominadas NM101 y NM105, contra una batería de bacterias Gram-positivas y Gram-negativas. Se midió la actividad antibacteriana de las nanopartículas de TiO ₂ expuestas o no a la luz UV, y se observó un desplazamiento en la curva de crecimiento microbiano en todos los casos, revelando recuentos más bajos a medida que la concentración de TiO ₂ aumentaba.	Se recopilaron datos midiendo los valores de OD650 bajo diversas condiciones experimentales. Estas condiciones involucraron diferentes concentraciones de nanopartículas de TiO ₂ (NM101 y NM105) que variaron desde 0.78 hasta 100 µg mL ⁻¹ y la exposición a la activación por UV o la oscuridad. Cada valor representó el promedio de tres repeticiones realizadas en tres días diferentes, para un total de nueve datos. Se empleó un análisis estadístico ANOVA para evaluar los resultados, y se realizó un análisis por separado para cada conjunto de condiciones experimentales.	El estudio concluye que las nanopartículas de TiO ₂ activadas por luz UV tienen una fuerte actividad antibacteriana contra bacterias Gram-positivas y Gram-negativas en suspensión. La activación de estas nanopartículas produce una reducción en el crecimiento bacteriano a medida que aumenta la concentración de TiO ₂ . Escherichia coli fue el patógeno más afectado, con una reducción de 2-3 log UFC.mL ⁻¹ , y las nanopartículas NM105 TiO ₂ también redujeron la densidad bacteriana de las bacterias probióticas. Los resultados sugieren que esta tecnología podría utilizarse en la formulación de nuevos desinfectantes.
23	Feasibility of the solar/chlorine treatment for lipid regulator degradation in simulated and real waters: The oxidation chemistry	https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.102	El fundamento de llevado cabo en la investigación del estudio es evaluar la eficacia de diferentes procesos de tratamiento de agua para eliminar contaminantes y proporcionar agua potable segura.	Se describe diferentes experimentos y pruebas realizadas para comparar la eficacia de diferentes procesos de tratamiento de agua. Se utilizan diferentes técnicas analíticas para medir la concentración de contaminantes	Se menciona que se realizaron experimentos y pruebas para comparar diferentes procesos de tratamiento de agua, y se midió la concentración de contaminantes en el agua antes y después del	La conclusión es que ambos procesos de tratamiento de agua (UV/cloro y UV/H ₂ O ₂) son efectivos para la eliminación de contaminantes en el

	and affecting factors			en el agua antes y después del tratamiento, y se comparan los resultados de diferentes procesos de tratamiento. También se analizan los mecanismos de eliminación de contaminantes en cada proceso y se evalúan los requisitos de energía para cada uno.	tratamiento utilizando diferentes técnicas analíticas. Es probable que los datos se hayan recopilado a través de mediciones y análisis de laboratorio realizados en muestras de agua tratada y no tratada.	agua, pero el proceso de UV/H ₂ O ₂ es más eficiente y requiere menos energía que el proceso de UV/cloro. Los autores también proporcionan información detallada sobre los mecanismos de eliminación de contaminantes en cada proceso y los requisitos de energía para cada uno.
24	Inactivation of Escherichia coli and MS2 coliphage via singlet oxygen generated by homogeneous photosensitization	10.1007/s11814-019-0353-4	El fundamento de la investigación es explorar la inactivación de Escherichia coli y MS2 coliphage mediante la generación de oxígeno singlete a través de la fotosensibilización homogénea, y examinar su potencial aplicación en el tratamiento de agua.	se utilizó un sistema de fotosensibilización homogénea visible para generar ¹ O ₂ y se realizaron experimentos de inactivación de Escherichia coli y MS2 bajo diferentes condiciones, incluyendo variaciones en pH, intensidad de luz, concentración de RB y presencia de oxígeno disuelto. La concentración de ¹ O ₂ se monitoreó utilizando un compuesto de sonda, furfural alcohol (FFA), y se utilizó el modelo Chick-Watson para graficar la inactivación de Escherichia coli y MS2 como una función de la exposición a ¹ O ₂ .	Se tomaron muestras en intervalos de tiempo y se analizaron para contar las células o partículas virales viables. También se evaluaron las concentraciones residuales de FFA en algunos experimentos. Se realizaron al menos tres repeticiones de cada experimento y se presentaron los promedios con desviaciones estándar. En experimentos anóxicos, se utilizó una cámara de N ₂ y se purgó la solución con gas N ₂ . Se varió la intensidad de la luz entre 50, 100 y 200 mW/cm ² ajustando la distancia entre el reactor y la fuente de luz.	El estudio concluye que la generación de ¹ O ₂ mediante fotosensibilización puede ser efectiva para inactivar microorganismos en el tratamiento de agua. La eficacia aumenta con la intensidad de la luz y la concentración del fotosensibilizador, y es más alta a pH 5.7 para Escherichia coli. En general, sugiere que esta técnica es prometedora para la desinfección del agua.
25	A systematic investigation on the	https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.12.012	El fundamento de la investigación es explorar el potencial de la materia orgánica natural para	Se utilizaron diferentes tipos de agua (agua destilada, agua del grifo y agua de río) y diferentes tratamientos (solar, foto-Fenton	Se utilizaron varios equipos analíticos, como un espectrofotómetro UV-Vis, un analizador de carbono	La investigación aborda los mecanismos de desinfección y la generación de especies

	bactericidal transient species generated by photo-sensitization of natural organic matter (NOM) during solar and photo-Fenton disinfection of surface waters		desinfectar el agua mediante la generación de especies transitorias bactericidas por fotosensibilización durante la desinfección solar y foto-Fenton de aguas superficiales.	y control) para investigar la generación de especies transitorias bactericidas durante la desinfección de aguas superficiales mediante fotosensibilización de materia orgánica natural. Sin embargo, no se proporciona información detallada sobre los métodos utilizados en el diseño experimental.	orgánico total (TOC), una sonda de oxígeno y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) para medir diversas concentraciones y evaluar la cinética de las reacciones. También se cuantificó la concentración de H ₂ O ₂ durante la reacción mediante métodos específicos.	bactericidas en aguas superficiales mediante fotosensibilización de materia orgánica natural, pero no específica hallazgos detallados. Su contribución radica en la comprensión de estos procesos y su aplicación en el tratamiento del agua.
26	Solar photocatalytic disinfection using ink-jet printed composite TiO ₂ /SiO ₂ thin films on flexible substrate: Applicability to drinking and marine water	https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.038	El objetivo de la investigación es evaluar la posibilidad de aplicar una técnica llamada "desinfección fotocatalítica solar" a nivel de laboratorio a través del uso de películas compuestas impresas a base de TiO ₂ /SiO ₂ sobre un sustrato flexible. Las aplicaciones de esta técnica son purificación de agua de bebida y agua de mar.	La investigación consistió en imprimir películas compuestas a base de TiO ₂ /SiO ₂ sobre un sustrato flexible, seguido por pruebas de desinfección fotocatalítica solar en agua contaminada con <i>Vibrio</i> spp., que son bacterias comúnmente encontradas en el agua de mar y pueden ser peligrosas para la salud humana. Las pruebas se realizaron en recipientes de vidrio bajo luz solar natural durante días soleados. Los resultados se analizaron por medio de mediciones de la irradiación solar, la densidad óptica y la supervivencia bacteriana.	Los autores realizaron pruebas en el laboratorio, incluyendo mediciones de ángulos de contacto en superficies, análisis de concentración de iones y salinidad en aguas, y pruebas de desinfección solar. Estas pruebas evaluaron la efectividad de películas compuestas de TiO ₂ /SiO ₂ en la desinfección de patógenos bacterianos en el agua.	Los autores concluyeron que las películas compuestas impresas a base de TiO ₂ /SiO ₂ sobre un sustrato flexible son efectivas para la desinfección fotocatalítica solar del agua contaminada con bacterias, y que esta técnica puede ser aplicada tanto para agua potable como para agua de mar. La desinfección fotocatalítica solar es un método prometedor, especialmente para el tratamiento de agua de mar con alta salinidad.
27	Photodynamic Water Disinfection	10.1134/S1070363215010466	Investigación sobre el uso de acetato de proflavina y azul de metileno en tratamiento fotodinámico para descontaminar embalses de agua. Experimentos de	Desarrollo de un método de desinfección fotodinámica para purificar el agua. Uso de sensibilizadores como el azul de metileno y ftalocianina de aluminio sulfonado. Proceso	Exploración del tratamiento fotodinámico con acetato de proflavina para descontaminar embalses de agua. Eficacia en suprimir el crecimiento bacteriano con	Desarrollo exitoso de un método de desinfección de agua basado en el efecto fotodinámico tras investigaciones

			laboratorio y campo para evaluar la eficacia en la supresión del crecimiento bacteriano y minimizar el impacto en organismos acuáticos. Busca desarrollar un método eficaz y respetuoso con el medio ambiente para desinfectar el agua en embalses.	consta de clarificación, desinfección fotodinámica, eliminación de contaminantes químicos, y desinfección final. Evaluación de eficacia en laboratorio y en masas de agua reales con diferentes fuentes de luz.	poco impacto en organismos superiores. Prometedor para garantizar la seguridad del agua. Proporciona información sobre concentraciones umbral de sensibilizadores en embalses.	interdisciplinarias. Uso del acetato de proflavina como sensibilizador recomendado para desinfección de agua en emergencias. Ventajas económicas y promisorias de la desinfección fotodinámica con luz solar en comparación con la artificial para condiciones de campo.
28	The role of visible light active TiO ₂ specimens on the solar photocatalytic disinfection of Escherichia coli	10.1007/s11356-016-7769-8	El estudio evalúa el uso de fotocatalizadores de TiO ₂ para desinfectar el agua contaminada con Escherichia coli y eliminar la materia orgánica. Examina factores como el pH y la presencia de ácido húmico en el proceso y analiza la materia orgánica liberada y el rebrote de Escherichia coli .	El estudio involucró experimentos fotocatalíticos solares con varios tipos de fotocatalizadores de TiO ₂ . Los fotocatalizadores se prepararon con dopaje de nitrógeno (N), selenio (Se) o ambos. Se utilizaron instrumentos y técnicas para medir el recuento de Escherichia coli , el carbono orgánico no purgable, propiedades espectroscópicas y la lixiviación de Se y NO ₃ ⁻ . Además, se llevaron a cabo experimentos de recrecimiento para evaluar las propiedades bactericidas de los fotocatalizadores, y no se observó rebrote de Escherichia coli tras el tratamiento.	El estudio se enfoca en la eliminación fotocatalítica solar de Escherichia coli con varios fotocatalizadores y analiza la materia orgánica liberada. El objetivo es mejorar métodos sostenibles de tratamiento de agua. La investigación aporta ideas valiosas para el tratamiento eficiente de patógenos y materia orgánica en fuentes de agua.	El tratamiento fotocatalítico con TiO ₂ , tanto dopado como no dopado, es efectivo para eliminar Escherichia coli en el agua. La presencia de ácido húmico puede influir en la evaluación del tratamiento. No hubo rebrote de Escherichia coli , lo que indica que TiO ₂ tiene propiedades bactericidas. La concentración de TiO ₂ y el tipo de dopaje afectan a la eficacia. Se observaron características de sustancias húmicas en la materia orgánica liberada durante el tratamiento.

29	Fabrication of a catalytic polymer composite sheet enabling visible light-driven photocatalytic disinfection of water	10.1007/s11164-015-2323-8	El estudio se enfoca en crear y caracterizar una lámina catalítica de polímero compuesto para la desinfección fotocatalítica. Para ello, sintetizan partículas de vanadato de bismuto (BiVO ₄) y las incorporan en una matriz polimérica. Luego, evalúan la actividad antibacteriana del material compuesto con luz visible y estudian sus efectos a largo plazo tras la exposición a la luz.	Los autores llevaron a cabo una metodología que comprendía la síntesis de Ag/BiVO ₄ , la creación de una lámina catalítica de polímero compuesto, pruebas de desinfección fotocatalítica con Escherichia coli, pruebas de actividad antibacteriana en ciclos de desinfección y evaluaron el efecto de degradación de la luz en el material compuesto.	Los autores llevaron a cabo un estudio experimental en el que crearon una lámina compuesta mediante la disolución de polietersulfona en dimetilformamida (DMF) y la adición de partículas de Ag/BiVO ₄ . Para evaluar su actividad antibacteriana, expusieron esta lámina a una mezcla de Escherichia coli (Escherichia coli) y midieron la concentración de bacterias a intervalos de tiempo. También reciclaron la lámina compuesta en tres ciclos de desinfección y estudiaron su degradación bajo exposición continua a la luz visible durante 240 horas.	Este estudio abordó el desafío de separar y reciclar partículas de fotocatalizador al incrustar nanocompuestos de Ag/BiVO ₄ en una matriz polimérica. La lámina resultante, expuesta a la luz, mostró una efectiva actividad antibacteriana y se mantuvo estable durante 300 horas sin deterioro. Este desarrollo podría llevar a un sistema portátil, económico y reutilizable para desinfectar agua.
30	Solar-excited graphene quantum dots for bacterial inactivation via generation of reactive oxygen species	https://doi.org/10.1080/10590501.2019.1591701	El estudio investiga cómo los quantum dots de grafeno (GQDs) excitados por luz solar generan especies reactivas de oxígeno (ROS) que pueden descomponer la membrana celular y matar bacterias. Además, se comparó la capacidad de los GQDs para matar bacterias con la de un conocido fotocatalizador, el dióxido de titanio (TiO ₂), y se evaluó la efectividad de los GQDs en la desinfección del agua solar.	Los investigadores sintetizaron GQDs y evaluaron su actividad antibacteriana en células de Escherichia coli con y sin exposición a luz solar simulada. También investigaron los efectos en los niveles de ROS, peroxidación lipídica, capacidad prooxidante y especies de radicales libres generados por los GQDs activados por luz solar, utilizando diversas técnicas y equipos de laboratorio y espectroscopia.	La investigación es importante porque ofrece una alternativa eficiente y económica para el tratamiento de aguas contaminadas y la desinfección ambiental. Los GQDs excitados por la luz solar inactivan bacterias de manera comparable al TiO ₂ , un material comúnmente usado, pero son más selectivos y seguros para las células de mamíferos. Además, los GQDs son de fácil síntesis y bajo costo, lo que los hace atractivos para	Los GQDs excitados por luz solar tienen una fuerte actividad antibacteriana, generando ROS que dañan las células bacterianas. Esto sugiere que los GQDs pueden usarse eficazmente como fotocatalizadores para eliminar microorganismos en el agua, prometiendo aplicaciones en la desinfección solar del agua y la eliminación de bacterias.

					aplicaciones de eliminación bacteriana y desinfección.	
31	Water disinfection by solar energy	https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1666182	Los investigadores buscan explorar la desinfección solar como una solución de bajo costo y sostenible para tratar el agua contaminada. Su objetivo es evaluar su eficacia, estudiar factores que la afectan y compararla con otros métodos de desinfección en diversas condiciones.	Los autores llevaron a cabo un experimento de laboratorio utilizando tres contenedores diferentes, expuestos a la radiación solar con diferentes configuraciones de espejos. Midieron regularmente la cantidad de coliformes totales, Escherichia coli y P. aeruginosa en el agua y controlaron las temperaturas. Utilizaron métodos de análisis certificados, como IDEXX, para evaluar la desinfección.	Se utilizaron métodos de ensayo rápido utilizando la configuración IDEXX. Las muestras de agua se recolectaron y se trataron con tiosulfato sódico para eliminar el cloro residual. Luego, se usaron reactivos específicos (colisure para coliformes totales y Escherichia coli, Pseudalert para P. aeruginosa) y se incubaron las muestras. Los resultados se evaluaron según los cambios de color y fluorescencia bajo luz UV en las bandejas Quanti-Tray/2000.	La investigación concluyó que el aumento de la radiación solar UV acelera la desinfección del agua. El uso de espejos planos y cóncavos para redirigir esta radiación mejoró significativamente la desinfección de agua contaminada. La unidad con espejo plano fue la más efectiva, seguida por la unidad con espejo cóncavo, y la unidad sin espejo fue la menos efectiva. Este método se considera prometedor, más rápido y económico en comparación con otros métodos avanzados de desinfección del agua.
32	Influence of process variables on the kinetic parameters of a Langmuir-Hinshelwood expression for E.coli inactivation during the photocatalytic	10.1080/01496395.2019.1676784	El estudio se centra en cómo diversas variables de proceso afectan la desinfección del agua mediante métodos fotocatalíticos, especialmente la inactivación de Escherichia coli. Estudian la influencia de la concentración de fotocatalizador, potencia de irradiación, pH inicial y sales inorgánicas en la eficacia de la desinfección. Además, se	Los autores llevaron a cabo experimentos para estudiar cómo las variables de proceso afectan la desinfección del agua con fotocatalisis. Utilizaron dióxido de titanio (TiO ₂) como fotocatalizador y examinaron cómo la concentración de fotocatalizador, potencia de irradiación, pH inicial y sales inorgánicas influyen en la inactivación de Escherichia coli.	Se llevaron a cabo experimentos para evaluar el efecto de varias variables de proceso en la desinfección del agua mediante fotocatalisis. Utilizaron un sistema experimental para controlar las variables y medir la tasa de inactivación de Escherichia coli a lo largo del tiempo. Es probable que emplearan técnicas de	Los autores concluyen que la eficacia de la desinfección fotocatalítica del agua depende de factores como la concentración del fotocatalizador, la potencia de irradiación, el pH inicial y la presencia de sales inorgánicas. Un aumento en la

	disinfection of water		menciona la utilidad de la expresión de Langmuir-Hinshelwood para entender la cinética de la inactivación de Escherichia coli en este proceso.	Luego, aplicaron la expresión de Langmuir-Hinshelwood para analizar los datos experimentales y entender la cinética de inactivación de Escherichia coli en la desinfección fotocatalítica.	espectroscopía y microscopía para analizar la cinética de inactivación de Escherichia coli durante la desinfección fotocatalítica, pero faltan detalles específicos sobre cómo se recopilaron los datos experimentales.	concentración de fotocatalizador y potencia de irradiación mejora la inactivación de Escherichia coli. El impacto de las sales inorgánicas en la desinfección varía según el tipo y la concentración de la sal. El estudio utiliza la expresión de Langmuir-Hinshelwood para comprender la cinética de la inactivación de Escherichia coli durante la desinfección fotocatalítica, siendo útil para diseñar y optimizar estos procesos.
33	Visible-light-driven photocatalytic inactivation of MS2 by metal-free g-C ₃ N ₄ : Virucidal performance and mechanism	http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.009	El estudio busca evaluar si la fotocatalisis con g-C ₃ N ₄ es eficaz para inactivar el virus MS2 bajo luz visible. Se parte de la idea de que los virus son resistentes a los métodos tradicionales de desinfección, y aunque g-C ₃ N ₄ ha funcionado para eliminar contaminantes orgánicos y bacterias, no se ha investigado suficientemente su efectividad contra virus, lo que motivó esta investigación.	El estudio sintetizó el fotocatalizador g-C ₃ N ₄ y lo caracterizó. Luego, evaluó su capacidad para inactivar el virus MS2 bajo luz visible utilizando un reactor discontinuo. Se analizaron varios parámetros y se midió la eficacia de la inactivación midiendo la concentración de virus sobrevivientes. Además, se estudió el mecanismo de inactivación analizando las especies reactivas de oxígeno generadas durante el proceso.	Se realizaron experimentos de inactivación viral en un reactor por lotes. Se expuso el virus MS2 a g-C ₃ N ₄ y luz visible durante varios tiempos, luego se midió la inactivación viral. Se usaron pruebas de PCR y electroforesis en gel para confirmar la degradación del ARN viral. También se realizaron análisis de especies reactivas de oxígeno (ROS) para entender el proceso de inactivación viral.	El estudio concluye que la fotocatalisis con g-C ₃ N ₄ sin metales es eficaz para inactivar el virus MS2 con luz visible. Se observó que esta tecnología generaba especies reactivas de oxígeno, como radicales superóxido, que inactivan el virus. La eficacia aumentó con la concentración de g-C ₃ N ₄ , la del virus y el tiempo de irradiación. La inactivación

						involucra daño en proteínas y ácidos nucleicos virales. Esto sugiere que la fotocatalisis con g-C ₃ N ₄ tiene potencial en la desinfección de virus transmitidos por el agua como una alternativa rentable y respetuosa con el medio ambiente a métodos convencionales.
34	Visible-light-driven, water-surface-floating antimicrobials developed from graphitic carbon nitride and expanded perlite for water disinfection	10.1016/j.chemosphere.2018.05.163	se enfoca en estudiar la eficacia de la desinfección fotocatalítica con g-C ₃ N ₄ /EP para inactivar virus en agua. Se analizan variables como la salinidad, la dureza del agua, la temperatura y el pH para comprender su impacto en la eficacia de la desinfección. Además, se investiga el mecanismo de inactivación de virus a través de especies reactivas de oxígeno (ROS). El objetivo es proporcionar información para optimizar la desinfección fotocatalítica de manera efectiva y segura en el tratamiento del agua.	Los investigadores sintetizaron el material g-C ₃ N ₄ /EP y lo caracterizaron usando diversas técnicas. Luego, evaluaron su capacidad fotocatalítica para inactivar Escherichia coli y el fago MS2 en condiciones de calidad del agua variables. Identificaron especies oxidativas clave y mecanismos de inactivación y probaron la estabilidad y reutilización del material. Compararon su desempeño con otros métodos de desinfección como la irradiación UV y la cloración.	Los investigadores evaluaron el material g-C ₃ N ₄ /EP para inactivar Escherichia coli y el fago MS2 bajo diversas condiciones de calidad del agua. Utilizaron experimentos en laboratorio y técnicas analíticas para recopilar datos detallados y caracterizar el material.	El material g-C ₃ N ₄ /EP es prometedor como fotocatalizador para la desinfección del agua, especialmente contra virus transmitidos por el agua. Es efectivo, estable y capaz de inactivar tanto bacterias como virus en diversas condiciones del agua. El estudio identificó especies reactivas de oxígeno como responsables de la inactivación de microorganismos.
35	Photocatalytic disinfection performance in virus and virus/bacteria system by Cu-TiO ₂	https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.074	El principal objetivo de la investigación es explorar el desempeño de la fotocatalisis visible utilizando nano-fibras de Cu-TiO ₂ en la desinfección de virus y en el sistema virus/bacterias	Los investigadores estudiaron la desinfección con fotocatalisis utilizando nano-fibras de Cu-TiO ₂ en presencia de luz visible, utilizando bacteriófago f2 y Escherichia coli 285 como microorganismos modelo.	En el experimento, se usó un reactor de desinfección fotocatalítica donde se combinó una solución de microorganismos con nano-fibras de Cu-TiO ₂ . La fuente de luz visible fue una	Los investigadores concluyeron que las nano-fibras de Cu-TiO ₂ son altamente efectivas para eliminar tanto el bacteriófago f2 como Escherichia coli 285

	nanofibers under visible light		mixtas. Además, busca investigar los efectos de varios parámetros en la eficiencia de la inactivación fotocatalítica	Analizaron varios parámetros, como la concentración inicial de microorganismos, la dosificación del catalizador, la intensidad de la luz y la temperatura, para evaluar la eficiencia de la inactivación fotocatalítica. También realizaron experimentos con sistemas de virus/bacterias mixtas para examinar la efectividad de la inactivación fotocatalítica en ese contexto. Utilizaron diversas técnicas para preparar el catalizador, caracterizar su estructura y evaluar su capacidad para desinfectar.	lámpara de xenón con un filtro de corte de 400 nm. Se ajustó el pH con ácido clorhídrico y hidróxido de sodio. Se realizaron experimentos en sistemas de virus individuales para estudiar los efectos de diferentes parámetros. También se realizaron pruebas en sistemas de virus/bacterias mixtas para una evaluación más realista. Los resultados se analizaron utilizando la ecuación de eficacia de eliminación de microorganismos.	bajo la luz visible. Varios factores, como la concentración inicial de microorganismos, la cantidad de catalizador, la intensidad de la luz y la temperatura, afectaron la eficacia de la eliminación. También se observó que los virus son más resistentes a la inactivación fotocatalítica que las bacterias. En sistemas de virus/bacterias mixtas, la presencia de <i>Escherichia coli</i> 285 afectó la inactivación del bacteriófago f2 debido a la competencia de absorción, pero la presencia de bacteriófago f2 no afectó significativamente la inactivación de <i>Escherichia coli</i> 285.
36	Selective Inactivation of Bacteriophage in the Presence of Bacteria by Use of Ground Rh-Doped SrTiO ₃ Photocatalyst and Visible Light	10.1021/acsami.7b07786	El estudio investiga la eficacia de los fotocatalizadores en la inactivación de bacteriófagos y bacterias en el agua mediante luz visible. Se utilizan fotocatalizadores de óxido de titanio con dopaje de rutenio y calentados a alta	Los investigadores prepararon fotocatalizadores de óxido de titanio dopados con rutenio, luego evaluaron su actividad fotocatalítica inactivando bacteriófagos y bacterias en agua con luz visible. Para ello, los investigadores expusieron la solución de agua contaminada	El fotocatalizador g-STO:Rh(1%) mostró una fuerte actividad antibacteriana y antiviral con luz visible. La superficie del fotocatalizador es clave para su actividad. La presencia de iones Rh ⁴⁺ y una gran área superficial contribuyen a la	La conclusión del estudio es que el fotocatalizador g-STO:Rh(1%) demostró una alta actividad antibacteriana y antifago bajo irradiación de luz visible, lo que sugiere

			temperatura para mejorar la actividad. El objetivo principal es encontrar una solución sostenible para la desinfección del agua mediante fotocatalizadores y luz visible.	con bacteriófagos y bacterias a la luz visible en presencia de los fotocatalizadores. Realizaron análisis de TEM y XPS para caracterizar los fotocatalizadores.	efectividad antiviral. Aunque eficaz, los mecanismos exactos de inactivación de los bacteriófagos aún se desconocen.	que tiene un gran potencial para su uso en la desinfección de agua . Además, se observó que la superficie del fotocatalizador g-STO:Rh(1%) es importante para facilitar la actividad fotocatalítica .
37	Enhanced visible-light-driven photocatalytic bacteria disinfection by g-C ₃ N ₄ -AgBr	http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.01.003	El estudio se enfoca en la desinfección de baja dosis de luz (VLD) utilizando g-C ₃ N ₄ -AgBr como fotocatalizador. Examina cómo el pH y el oxígeno influyen en la eficacia de la desinfección VLD y explora los mecanismos subyacentes. El objetivo principal es evaluar el potencial de g-C ₃ N ₄ -AgBr como fotocatalizador para la desinfección del agua y entornos naturales.	Para diseñar el experimento, los investigadores sintetizaron primero el fotocatalizador g-C ₃ N ₄ -AgBr y lo caracterizaron mediante diversas técnicas. A continuación, prepararon soluciones madre de bacterias y las inocularon en una suspensión de g-C ₃ N ₄ -AgBr. La suspensión se irradió con luz visible utilizando una lámpara de arco de xenón, y la eficacia del proceso de desinfección se midió mediante técnicas como el recuento de colonias y la reducción de NBT. Los investigadores también estudiaron el efecto del pH en la eficacia del proceso de desinfección y verificaron los mecanismos implicados en el proceso de desinfección mediante diversas técnicas.	Esta investigación es importante debido a su potencial para ofrecer un método nuevo y efectivo de desinfección del agua y entornos naturales. Aborda la necesidad de alternativas más sostenibles y rentables a los métodos tradicionales de desinfección. Además, proporciona información valiosa sobre los mecanismos de desinfección por luz visible, que puede ser útil para futuras investigaciones.	El estudio encontró que el g-C ₃ N ₄ -AgBr es un eficaz fotocatalizador para la desinfección de bacterias, tanto Gram negativas como Gram positivas, utilizando luz visible. El proceso se ve afectado por el pH y la presencia de oxígeno. Esto sugiere que el g-C ₃ N ₄ -AgBr tiene un gran potencial para la desinfección del agua y entornos naturales, ofreciendo valiosos conocimientos sobre los mecanismos involucrados en la desinfección por luz visible y su aplicación en el tratamiento del agua y la remediación ambiental.
38	Red phosphorus: An earth-abundant elemental	10.1021/acs.est.5b00531	La investigación se centra en el uso del fósforo rojo como un fotocatalizador económico	El estudio sintetizó fósforo rojo por vía hidrotérmica y evaluó su eficacia como fotocatalizador	El estudio se basó en preparar muestras bacterianas de <i>Escherichia coli</i> y exponerlas	El fósforo rojo es un fotocatalizador efectivo para inactivar

	photocatalyst for “green” bacterial inactivation under visible light		y ecológico para inactivar bacterias bajo luz visible. Busca ofrecer una alternativa a fotocatalizadores costosos y menos comunes, como el dióxido de titanio, con el objetivo de aplicar la fotocatalisis con luz visible en el tratamiento y desinfección del agua.	para inactivar bacterias bajo luz visible. Utilizó Escherichia coli como bacteria modelo, probando el fósforo rojo con diferentes fuentes de luz e intensidades. Además, empleó técnicas analíticas, como tinción de fluorescencia y microscopía electrónica, para entender el mecanismo de inactivación bacteriana por el fósforo rojo.	al fósforo rojo bajo diferentes condiciones de luz, luego midieron la inactivación bacteriana en intervalos de tiempo y analizaron daños oxidativos en proteínas y ADN. También realizaron observaciones microscópicas para ver cambios morfológicos en las células bacterianas.	bacterias bajo luz visible. La investigación encontró que puede eliminar con éxito la Escherichia coli con mayor intensidad de luz visible. Además, el fósforo rojo causa daños en proteínas bacterianas y ADN, llevando a la inactivación. Esto sugiere su potencial como un fotocatalizador asequible para el tratamiento y desinfección del agua.
39	Synergistic photocatalytic inactivation mechanisms of bacteria by graphene sheets grafted plasmonic AgeAgX (X ¼ Cl, Br, I) composite photocatalyst under visible light irradiation	http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.055	El fundamento de la investigación es la evaluación del uso de grafeno con tecnologías de fotocatalisis plasmonica para la desinfección del agua. En particular, los autores investigaron la eficacia de los composites de grafeno y las sales de plata bajo irradiación de luz visible en la inactivación de bacterias, así como los mecanismos subyacentes de esta inactivación.	Los autores prepararon compuestos AgeAgX/0.5% RGO con diferentes proporciones de sales de plata y grafeno. Caracterizaron los compuestos mediante varias técnicas y evaluaron su eficacia en la inactivación de bacterias, especialmente Escherichia coli K-12, bajo luz visible. Realizaron estudios de mecanismos, incluida la liberación de iones de plata y análisis microscópicos para comprender cómo afectan a las bacterias.	Los datos se obtuvieron mediante pruebas de laboratorio que expusieron la bacteria Escherichia coli K-12 a compuestos de plata-grafeno. Se midió la cantidad de células viables a lo largo del tiempo y se compararon con controles. También se realizaron pruebas para entender los mecanismos de inactivación, incluyendo scavengers, sondas y liberación de iones de plata. Además, se examinó la morfología y la estructura interna de las bacterias tratadas con los compuestos mediante análisis microscópicos.	Los compuestos AgeAgX/0.5% RGO son efectivos antimicrobianos para la desinfección del agua mediante luz visible. Su actividad se debe a los componentes plasmónicos Ag, AgX y RGO trabajando en conjunto. Generan especies reactivas de oxígeno y liberan iones de plata que dañan sistemas biológicos. Se sugiere la necesidad de más estudios para comprender mejor los detalles del mecanismo

						de inactivación bacteriana.
40	Inactivation of pathogenic bacteria inoculated onto a Bacto™ agar model surface using TiO ₂ -UVC photocatalysis, UVC and chlorine treatments	10.1111/jam.12877	El fundamento de la investigación es evaluar la efectividad de diferentes técnicas de desinfección, incluyendo la fotocatalisis TiO ₂ -UVC, UVC y cloro, para inactivar bacterias patógenas en una superficie modelo simulada. El estudio se centra en la desinfección de frutas, verduras y otras superficies similares, y busca proporcionar información útil para la aplicación de estos procesos en la industria alimentaria.	El estudio utiliza un modelo de superficie alimentaria simulada hecha de agar y contaminada con diversas bacterias patógenas. Luego, aplica diferentes métodos de desinfección, como fotocatalisis TiO ₂ -UVC, UVC y cloro, para evaluar su eficacia en la reducción de las bacterias. Las células bacterianas también se observan mediante imágenes SEM. Los experimentos se realizan en un reactor personalizado y se analizan para identificar el método más efectivo de desinfección en este modelo simulado de superficie de alimentos.	Se realizó un experimento con un modelo de superficie alimentaria simulada hecha de agar, inoculada con bacterias patógenas como Escherichia coli K12, Salm. Typhimurium, Staph. aureus y L. monocytogenes. Se aplicaron diversos métodos de desinfección, como la fotocatalisis TiO ₂ -UVC, la UVC y el cloro, y se evaluó su eficacia midiendo la reducción bacteriana. Se usaron recuentos totales en placas y microscopía electrónica para analizar los cambios en las bacterias. El objetivo era determinar el método más efectivo para desinfectar la superficie alimentaria simulada.	El estudio encontró que la técnica TUVF es prometedora para la desinfección de superficies modelo y logra una inactivación bacteriana más efectiva, especialmente en bacterias Gram negativas, en comparación con la UVC sola y un control sin luz. Además, el tratamiento UVC-TiO ₂ fue eficaz para inactivar rápidamente bacterias como Escherichia coli K12, Salm. Typhimurium y Staph. aureus, aunque L. monocytogenes mostró mayor resistencia. El estudio destaca la utilidad de utilizar una superficie de agar modelo para investigar la desinfección bacteriana y sugiere que estos procesos podrían aplicarse en la desinfección de alimentos y otras superficies similares. También se señala que el agua clorada puede no ser suficiente para

						inactivar todos los patógenos bacterianos y puede generar riesgos para la salud debido a la formación de trihalometanos.
--	--	--	--	--	--	--