



**Metagenómica como herramienta de apoyo en estudios de aplicación de procesos
avanzados de oxidación como tratamientos de aguas. Acercamiento desde un análisis
bibliométrico**

María Alejandra Giraldo Bernal

11932112177

Universidad Antonio Nariño

Programa Maestría en Bioquímica

Facultad de Ciencias Básicas

Bogotá D.C. Colombia

2022

**Metagenómica como herramienta de apoyo en estudios de aplicación de procesos
avanzados de oxidación como tratamientos de aguas. Acercamiento desde un análisis
bibliométrico**

María Alejandra Giraldo Bernal

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Bioquímica

Director (a):
Alejandro Moncayo-Lasso, Dr. Sci.

Línea de Investigación en
Remediación Ambiental y Procesos Avanzados de Oxidación
Grupo de Investigación en Ciencias Biológicas y Químicas

Universidad Antonio Nariño
Programa Maestría en Bioquímica
Facultad de Ciencias Básicas
Bogotá D.C. Colombia
2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá, 18, octubre, 2022.

Contenido

Pág.

| | |
|--|----|
| 1. Resumen | 4 |
| 2. Abstract | 5 |
| 3. Introducción | 6 |
| 4. Planteamiento del problema | 9 |
| 5. Marco Teórico..... | 13 |
| 5.1 ¿Qué es la bibliometría y cómo se usa para medir y analizar el conocimiento científico? | 13 |
| 5.2 Normas AENOR:..... | 16 |
| 5.3 ¿Cómo PROKNOW-C se convierte en un método para generar conocimiento a partir de la identificación de oportunidades en la búsqueda científica?..... | 16 |
| 5.4 Metagenómica y sus enfoques: | 20 |
| 5.5 Procesos Avanzados de Oxidación (AOP): | 21 |
| 5.6 Aguas Residuales | 22 |
| 6. Estado del arte. | 25 |
| 7. Hipótesis | 33 |
| 8. Objetivos..... | 33 |
| 8.1 Objetivo General: | 33 |
| 8.2 Objetivos Específicos: | 33 |
| 9. Diseño Metodológico..... | 34 |
| 9.1 Características generales de la investigación:..... | 34 |
| 9.2 Desarrollo metodológico: | 35 |
| 9.2.1. Selección del portafolio | 35 |
| 9.2.2. Análisis bibliométrico | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 10. Resultados y análisis de resultados | 45 |
| 10.1 Selección del portafolio:..... | 45 |
| 10.2 Análisis Bibliométrico:..... | 46 |
| Teniendo en cuenta la lectura de los artículos del portafolio secundario y las preguntas planteadas, se analizan y responden cada una de ellas:..... | 52 |
| 10.2.1 ¿Cuál es el número de investigaciones en el mundo durante los últimos 18 años que involucran la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas? | 52 |
| 10.2.2 ¿Cómo se distribuyen las investigaciones por continentes y países?..... | 54 |
| 10.2.3 ¿Cuáles son los artículos con mayor reconocimiento científico?..... | 57 |
| 10.2.4 ¿Cómo se estructura la red de cooperación entre autores? Y ¿Cómo se distribuyen los autores en las redes? | 61 |
| 10.2.5 ¿Qué palabras clave se han usado con más frecuencia entre 2004-2022 en investigaciones que involucran la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas? | 65 |
| 10.2.6 ¿Cuáles fueron las áreas temáticas de interés en el tema de investigación? . | 70 |
| 10.2.7 ¿Cuáles son los enfoques más destacados de estudio en las investigaciones? | |
| 72 | |
| 11. Conclusiones..... | 78 |
| 12. Referencias Bibliográficas | 81 |
| 13. Anexos..... | 89 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. <i>a. Fase 1 de la selección del portafolio bibliométrico. b. Filtrado del portafolio bibliométrico</i> | 19 |
| Figura 2. <i>Proceso metodológico de selección de artículos</i> | 41 |
| Figura 3. <i>Diagrama de flujo de selección portafolio bibliométrico para su análisis.</i> | 47 |
| Figura 4. <i>Número de publicaciones globales 2004-2022 portafolio final</i> | 53 |
| Figura 5. <i>Número de publicaciones globales</i> | 55 |
| Figura 6. <i>Artículos con mayor reconocimiento entre los artículos del portafolio bibliográfico</i> | 58 |
| Figura 7. <i>Red de coautorías</i> | 62 |
| Figura 8. <i>Red de coautorías en el tiempo</i> | 63 |
| Figura 9. <i>Coautorías globales.</i> | 64 |
| Figura 10. <i>Coautorías globales por año</i> | 65 |
| Figura 11. <i>Red de co-currencias palabras clave del portafolio primario.</i> | 66 |
| Figura 12. <i>Red de co-currencias palabras clave del portafolio primario por años.</i> | 66 |
| Figura 13. <i>Red de coocurrencias del portafolio final</i> | 68 |
| Figura 14. <i>Red de coocurrencias del portafolio final por años.</i> | 69 |
| Figura 15. <i>Áreas temáticas de interés en el tema de investigación asociadas a los documentos que hacen parte del portafolio final.</i> | 71 |

Figuras y Tablas en Anexos:

| | |
|---|----|
| Figura complementaria 1: Cuadro comparativo entre bibliometría, informetría, cibermetría, cienciometría y webmetria | 89 |
| Figura complementaria 2: Etapas del método PROKNOW-C | 90 |
| Figura complementaria 3: Diagrama de flujo método PROKNOW-C..... | 91 |
| Figura complementaria 4: Análisis metagenómico y bioinformático de la comunidad microbiana..... | 92 |
| Figura complementaria 5: Varios Procesos de Oxidación Avanzadas. | 93 |
| Figura complementaria 6: Comparación de tendencias de uso de las bases de datos más usadas a nivel mundial en temas de educación y empleo: | 94 |

| | |
|--|----|
| Tabla complementaria 1: Etapas de búsqueda de información basadas en la norma UNE 166006:2011 | 95 |
| Tabla complementaria 2: Portafolio bibliográfico primario de 43 artículos. | 96 |

| | |
|--|------------|
| Tabla complementaria 3. Palabras más frecuentes en los artículos del portafolio primario..... | 101 |
|--|------------|

Lista de tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Ejes de búsqueda y palabras clave | 35 |
| Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda entre dos palabras clave y sus sinónimos. | 37 |
| Tabla 3. Ecuaciones de búsqueda entre tres palabras clave y sus sinónimos..... | 38 |
| Tabla 4. Artículos del portafolio bibliográfico final. | 48 |
| Tabla 5. Top de los 10 artículos con mayor reconocimiento..... | 59 |
| Tabla 6. Enfoques utilizados más destacados en las investigaciones del portafolio final..... | 72 |

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Abreviaturas

| Abreviatura del inglés | Término |
|-------------------------------|--|
| <i>AOP</i> | Advanced oxidation processes |
| <i>Proknow-C</i> | Knowledge Development Process-Constructivist |
| <i>WoS</i> | Web of Science |
| <i>ARG</i> | Antibiotic resistant genes |
| <i>ARB</i> | Antibiotic resistant bacteria |
| <i>PCR</i> | Polymerase chain reaction |
| <i>qPCR</i> | PCR en tiempo real |

1. Resumen

El presente trabajo aborda, a través de un análisis bibliométrico, el crecimiento y las tendencias de investigaciones publicadas entre 2004 y 2022 que involucran la metagenómica con los procesos avanzados de oxidación (AOP). Estos procesos son empleados en el tratamiento de aguas y han demostrado ser una interesante alternativa o complemento a los sistemas convencionales, tanto en la degradación de contaminantes orgánicos como en la eliminación de una gran diversidad de microorganismos; mostrando tener un excelente potencial de aplicación a gran escala como sistemas de tratamiento terciarios-complementarios para diferentes tipos de aguas contaminadas. Este estudio bibliométrico tuvo un enfoque cuantitativo con un alcance principalmente descriptivo y correlacional, usando el método ProKnow-C y una ruta referencial propuesta por UNE 166006:2011 de la entidad AENOR. Los datos recopilados se procesaron en gráficas de correlación, tendencias y co-ocurrencia y se analizaron mediante estadística descriptiva. Se obtuvo un portafolio final de 38 artículos, que demuestran un crecimiento en el número de publicaciones entre los años 2016 al 2022, en donde los países con mayor número de publicaciones fueron China, Estados Unidos, Brasil y España, y en donde las temáticas de estudios están enfocadas principalmente en el tratamiento de aguas residuales mediante AOP, los cuales permiten la eliminación tanto de contaminantes químicos (antibióticos) como biológicos. En este último caso, mediante el empleo de análisis metagenómicos se puede demostrar que estos procesos son capaces de eliminar, por ejemplo, bacterias resistentes a antibióticos y sus genes asociados a esa resistencia.

Palabras clave: Bibliometría, Procesos avanzados de oxidación, metagenómica, ProKnow-C, Aguas residuales, reactor biológico, comunidad genómica, degradación de contaminantes, tratamientos terciarios.

2. Abstract

The present work addresses, through a bibliometric analysis, the growth and trends of research published between 2004 and 2022 that involves metagenomics with advanced oxidation processes. These processes are used in water treatment and have proven to be an interesting alternative or complement to conventional systems, both in the degradation of organic pollutants and in the elimination of a wide variety of microorganisms, showing excellent potential for large-scale application as tertiary-complementary treatment systems for different types of polluted water. This bibliometric study had a quantitative approach with a mainly descriptive and correlational scope, using the ProKnow-C method and a referential route proposed by UNE 166006:2011 from the AENOR entity. The collected data was processed in correlation, trend and co-occurrence graphs and analyzed using descriptive statistics. A final portfolio of 38 articles was obtained, which demonstrates a growth in the number of publications between 2016 and 2022, where the countries with the highest number of publications were China, the United States, Brazil and Spain, and where the topics of these studies are mainly focused on the treatment of wastewater through advanced oxidation processes, which allow the elimination of both chemical (antibiotics) and biological contaminants. In the latter case, using metagenomic analysis, it can be shown that these processes are capable of eliminating, for example, antibiotic-resistant bacteria and their genes associated with that resistance.

Keywords: Bibliometrics, Advanced oxidation processes, metagenomics, ProKnow-C, Wastewater, biological reactor, community genomic, pollutant degradation, tertiary treatments.

3. Introducción

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) surgen como una necesidad de descontaminar las aguas provenientes de actividades antropogénicas en el sector urbano y rural. En estas plantas se realizan procesos físicos, químicos, y biológicos, que procesan el agua para eliminar un sinnúmero de contaminantes tanto de tipo químico como biológico. Sin embargo, se ha demostrado que estos procesos, no son del todo eficientes para eliminar un cierto tipo de sustancias (recalcitrantes como pesticidas, fármacos o productos de higiene o biológicos como bacterias, hongos o virus), por lo que se hace necesario mejorar los procesos actuales y/o buscar e implementar potenciales métodos adicionales (terciarios) complementarios o alternativos que permitan superar este inconveniente alcanzando una mayor eficiencia en la eliminación de los contaminantes (Garrido Cárdenas et al., 2017).

Existen muchas técnicas no convencionales enfocadas en el tratamiento de aguas, como lo son los procesos de reducción avanzada (ARP) y los procesos de oxidación avanzada (AOP, sigla del inglés), siendo estos últimos los que han demostrado ser muy eficientes en la remoción de una gran cantidad de compuestos orgánicos y en la inactivación de microorganismos con un rendimiento más alto en comparación con los procesos de reducción (Capodaglio, 2020) y métodos convencionales como la cloración y radiación ultravioleta, los cuales no suelen lograr la inactivación completa de todos los microorganismos presentes en las aguas. Recientemente se han reportado trabajos en los que los AOP se emplean en la degradación de variedad de compuestos farmacéuticos (Hou et al., 2019; Vilela et al., 2022) y en la eliminación de microorganismos patógenos (Lu et al., 2015; Martínez-Pachón et al., 2021). Se ha reportado que “los radicales superóxido (ROS), generados en los diferentes AOP, pueden inducir daño en los microorganismos por estrés oxidativo cuando las concentraciones son lo suficientemente elevadas como para superar

la capacidad de defensa de las células”(Galeano et al., 2019) , provocándose incluso una serie de daños en el material genético; por ejemplo, la acción de los radicales HO• sobre los componentes de la célula puede llegar a ser completo e irreversible, por lo que los microorganismos (patógenos por ejemplo) no pueden recuperar su viabilidad (Galeano et al., 2019). Lo anterior se demostró en bacterias como *Salmonella typhimurium*, *E. coli* (a través de la reacción Fenton), *Cryptosporidium spp* (mediante fotocatalisis con TiO₂), endosporas de *Bacillus subtilis* (con oxidación vía foto-Fenton), *Enterococcus faecalis* (con oxidación vía foto-Fenton), *Enterococcus sp* (con oxidación vía foto-Fenton), *Pseudomona aeruginosa*, *Fusarium solani* (con oxidación vía foto-Fenton) (Galeano et al., 2019).

Por otro lado, el análisis metagenómico recientemente ha venido empleándose como una herramienta poderosa para tratar de entender el efecto causado por los AOP en las diferentes poblaciones de microorganismos (principalmente bacterias) presentes en aguas contaminadas, e igualmente en parte de su material genético. Con el objetivo de ampliar su potencial aplicación, es importante establecer sus fundamentos y potencialidades en el campo de la remediación (desinfección) de aguas contaminadas. Existen ya algunos reportes en los que a través de estos análisis metagenómicos se han podido determinar la biodiversidad de las poblaciones de microorganismos presentes y cómo el tratamiento AOP afecta esa población (Martínez-Pachón et al., 2021), igualmente, un acercamiento al seguimiento de la dinámica metabólica de la comunidad microbiana en las aguas (Garrido-Cardenas et al., 2017) e inclusive en la ampliación de bibliotecas metagenómicas relacionadas con la matriz y encontrar nuevos genes catabólicos para la degradación de xenobióticos (Eyers et al., 2004).

Es así, como se plantea en el presente trabajo identificar mediante un estudio bibliométrico, las tendencias en investigaciones reportadas en artículos publicados entre 2004 y 2022, que

involucren la metagenómica como herramienta de apoyo en el uso de AOP al tratamiento de agua, principalmente en la inactivación de microorganismos. Para lo anterior, se establecieron indicadores bibliométricos como: indicadores de producción (a través del análisis de crecimiento exponencial), indicadores de dispersión (por medio del reconocimiento científico), indicadores de colaboración (trabajado en las coautorías). Del mismo modo, se analizaron los datos obtenidos, principalmente la distribución temporal y geográfica, los actores más influyentes y el grado de madurez de la investigación (este último partiendo de un análisis de enfoque); para finalmente describir el comportamiento estadístico de la información y de los análisis hechos. Cada una de las acciones mencionadas tomaron fundamento en la metodología cuantitativa-descriptiva desde Proknow-C y la ruta UNE 166006:2011 de la entidad AENOR, usando la estadística descriptiva.

El desarrollo del trabajo consistió en dos etapas, la primera residió en la selección del portafolio, en donde se definieron las palabras clave, las bases de datos a usar, realizar las combinaciones para las búsquedas preliminares, hacer las pruebas de adherencia, y finalmente alinear los artículos al tema de investigación, junto con la formación de un portafolio primario sin redundancias. En la segunda etapa, se desarrolló un análisis bibliométrico, construyendo en éste, el portafolio final y estableciendo los indicadores bibliométricos del portafolio, junto con sus análisis y discusiones. Para el desarrollo de las gráficas y redes de relaciones, se usó el software Vosviewer, Excel y herramientas de análisis de las bases de datos de SCOPUS y WoS.

4. Planteamiento del problema

El agua es un recurso vital y limitado para los seres vivos (tan solo el 0.65% es apta para consumo humano (Oturán & Aaron, 2014)) con propiedades especiales que permiten la vida y su desarrollo; debido a esta potencialidad del agua como solvente universal, es tan útil en todas las actividades humanas, como lo son la agricultura, la industria, el uso doméstico, la salud, entre otros. Sin embargo, estas actividades generan residuos que al ser liberados al medio acuático sin un previo y adecuado tratamiento acarrearán deterioros en los ecosistemas y en la salud de todos los seres vivos, limitándose aún más las fuentes disponibles de consumo de este líquido vital a nivel mundial (Ferro et al., 2015), ya que la calidad del agua es afectada debido a la gran cantidad de patógenos y sustancias químicas de origen antropogénico (Prasse et al., 2015), lo que en regiones con gran escasez hídrica puede acrecentarse aún más la problemática; llevando incluso en algunos casos a la reutilización indirecta de agua no potable, o incluso agua potable obtenida a partir de aguas residuales tratadas. (Prasse et al., 2015).

Muchos de los contaminantes presentes en las aguas son de preocupación emergente (o llamados también emergentes) que son contaminantes que no se reconocían o no se habían podido detectar antes, debido a sus muy bajas concentraciones (ng/L – µg/L) (Richardson & Kimura, 2017). Muchos de ellos pueden no ejercer una toxicidad aguda, pero al ser xenobióticos y recalcitrantes, tienen la capacidad de bioacumularse, generando afectaciones por ejemplo a nivel endocrino. Muchos de estos contaminantes emergentes poseen propiedades diferentes de los contaminantes tradicionales; “actualmente son motivo de preocupación porque, aunque son emergentes la mayoría ha estado presente en el medio ambiente durante muchos años (algunos

durante décadas), pero no se detectaron anteriormente debido a la falta de instrumentos apropiados y altamente sensibles” (Richardson & Kimura, 2017).

Del mismo modo, ha pasado con el tratamiento y degradación de la carga microbiana, antibióticos y elementos genéticos (sobre todo aquellos de resistencia a antibióticos), que a pesar de que se remueve un porcentaje de microorganismos conocidos (sobre todo algunas enterobacterias) en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), el problema actual consiste en la no detección y por ende el no tratamiento o no seguimiento de microorganismos resistentes a antibióticos (ARB), de los genes de resistencia a antibióticos (ARG), de metabolitos de preocupación y en general de aquella comunidad microbiana y elementos genéticos presentes en aguas, que pueden generar afecciones y enfermedades. Lo anterior, ocurre ya que después de un tratamiento primario y secundario, se han encontrado ARB/ARG, debido a que estos tratamientos presentes en las PTAR no están diseñados para hacer frente a contaminantes de este tipo (Anthony et al., 2020), ni a los antibióticos también presentes en estas aguas.

Estos contaminantes, salen de las plantas de tratamiento y son enviados directamente a las fuentes hídricas manteniendo su riesgo. Algunos compuestos como los fármacos pueden presentar un potencial problema, puesto que, las bacterias o microorganismos presentes, entran en contacto con estas sustancias y promueven cambios en su material genético, o en su metabolismo, haciéndose resistentes y posiblemente patógenas (Capodaglio, 2020). Del mismo modo, también sobreviven a los procesos de tratamiento convencionales algunos microorganismos que pueden ser portadores de enfermedades (generando problemas respiratorios, gastrointestinales, etc; si se consumen, inhalan (esporas), o entran en contacto directo también con toxinas) (Bawiec et al., 2016); es decir “algunas plantas de tratamiento de aguas residuales actúan como caldos de cultivo

para las bacterias resistentes a los antibióticos y propagan los genes de resistencia a los antibióticos asociados al medio ambiente a través de la descarga de efluentes secundarios” (Yuan et al., 2019).

Ahora bien, en cuanto a la eliminación y degradación de tales contaminantes mencionados (antibióticos, ARG y ARB) se presentan dificultades principalmente asociadas a sus características químicas, físicas y biológicas (en el caso de los microorganismos) y debido a que hasta hace tan solo unas décadas se cuentan con las técnicas moleculares avanzadas que han proporcionado información sobre la fisiología y genómica de bacterias no cultivadas (Daims et al., 2006), que han favorecido la caracterización biológica de aguas contaminadas y la evaluación más exhaustiva, precisa y completa del efecto real de procesos de desinfección ya sea en (PTAR) que cuenten con la tecnología de desinfección o en la evaluación de sistemas alternativos y complementarios (di Cesare et al., 2020).

Teniendo en cuenta que los procesos primarios y secundarios para el tratamiento de este tipo de contaminantes no es efectivo, se han venido desarrollando en las últimas décadas tecnologías que permiten degradar estos contaminantes recalcitrantes como los denominados procesos de oxidación avanzada (AOP), que han demostrado ser una interesante alternativa para el tratamiento de aguas residuales, ya que son “prometedores, eficientes y respetuosos con el medio ambiente para eliminar los contaminantes orgánicos persistentes de las aguas” (Oturán & Aaron, 2014). Se basan en reacciones que generan radicales HO• que se pueden potenciar con radiación (Oturán & Aaron, 2014) por ejemplo en el rango UV-Vis (procesos fotoasistidos), a través de procesos electroquímicos o combinando alguno de ellos para mejorar aún más la reacción.

Por otro lado, la metagenómica en los últimos años ha empezado a tener una cabida en el campo biotecnológico ambiental al permitir análisis filogenéticos, de actividad enzimática, de

funciones metabólicas básicas de los metagenomas entre otras, proporcionando información relevante sobre el flujo de genes y la resistencia en las poblaciones microbianas (Garrido-Cárdenas & Manzano-Agugliaro, 2017). Por ejemplo, se ha usado esta técnica como parte de un estudio de aplicación de los AOP para el tratamiento de aguas residuales en gran escala, específicamente para sistemas Anammox, donde gracias a la metagenómica se detectó el predominio de comunidades complejas de *Nitrosomonas sp.*, y *Candidatus Kuenenia* (Cyzdik-Kwiatkowska & Zielińska, 2016) en aguas residuales domésticas. Del mismo modo, gracias a las bibliotecas metagenómicas Amos, G et al., (2014), examinaron la resistencia fenotípica a amikacina, gentamicina, neomicina, ampicilina y ciprofloxacina, y sus genes de resistencia en aguas residuales río abajo.

Por todo lo anterior, cabe señalar que es posible elucidar un posible aprovechamiento de la metagenómica como herramienta de apoyo a los procesos de oxidación avanzada aplicados como procesos de desinfección en diferentes fuentes de aguas contaminadas, para permitir un seguimiento más eficiente y detallado de la presencia de microorganismos potencialmente patógenos y determinar el efecto sobre ellos, sus genes y sus procesos metabólicos, llegando incluso a plantear mecanismos de inactivación más completos como lo muestran los trabajos de Martínez-Pachón et al., (2021); Lu et al., (2015); Amos et al., (2014); Yang et al., (2014), Hou et al., (2019); Chevremont et al., (2013); Coats et al., (2017); entre otros más.

Finalmente, se plantea como pregunta problema de este trabajo:

¿Cuál es la tendencia y distribución de trabajos de investigación de los AOP aplicados al tratamiento de aguas que involucran metodológicamente a la metagenómica (número de publicaciones, países con mayores publicaciones, redes de cooperación, áreas temáticas de interés, enfoques utilizados en las investigaciones)?

5. Marco Teórico

5.1 ¿Qué es la bibliometría y cómo se usa para medir y analizar el conocimiento científico?

Es una herramienta sistemática dentro de las especialidades métricas de la información (como la cienciometría, infometría, webmetría etc.), que “ha sido reconocida para evaluar, cuantificar e interpretar el estado de la ciencia” (Keiser & Utzinger, 2005), puesto que permite establecer el flujo de la información documental y conocer los procesos de producción y comunicación científica que en estos opera (Gorbea-Portal, 2016). Este término ha ido evolucionando en la medida en que se ha empezado a aplicar en campos diferentes a la bibliotecología, pasando de ser una aplicación del análisis estadístico para estudiar las características del uso y creación de documentos, a medir la actividad científica y por medio de un análisis bibliométrico predecir su tendencia, a través del estudio y análisis de la literatura recogida en cualquier tipo de soporte.

A su vez, su objeto de estudio son las características a nivel micro y macro de los sistemas de documentos (libros, documentos, revistas, artículos, autores, actividad bibliográfica, usuarios), incluyendo las co-relaciones y los patrones variados (Juárez, 2020), para ello se debe cuantificar primeramente la producción y el consumo de la información científica y luego analizar esos valores (López Piñero, 1972; Spinak 1996 citado por Ardanuy, 2012), esto se hace a través de fuentes como las bases de datos bibliográficas, en donde se emplean variables como: número de citas, frecuencia de aparición de palabras, palabra clave etc; en este último aspecto es más parecida a la cienciometría que describe Verdejo Martínez & Ontalba Ruipérez, (2011) en su tabla comparativa (Figura complementaria 1).

Como la bibliometría usa metadatos científicos, se pueden aplicar diferentes rutas, como revisiones sistémicas, revisiones integradoras, revisiones cualitativas, y estudios de mapeo, donde

este último se enfoca en los vínculos de la información relacionada con el material publicado y no exactamente en su contenido, pero que facilita obtener patrones significativos y otras ideas útiles (Juárez, 2020). En la revisión sistémica su enfoque es evaluar el material a profundidad, primero recopilándolo, luego seleccionándolo por método estandarizado y finalmente se aplica una síntesis metódica, que puede ser cualitativa o cuantitativa (“metaanálisis”) (Costa et al., 2021).

En definitiva, se puede decir que la bibliometría se divide en dos categorías: recuento de productividad por países (ubicación geográfica), autores, revistas, años de publicación (línea de tiempo) y disciplinas de estudio (área temática), etc., y recuento de referencias de uso de literatura científica y citas (autores y artículos más citados) (Hood y Wilson 2001; Osareh 1996 citados por Macías-Quiroga et al., 2021).

Con respecto a las leyes que soportan a la bibliometría Ardanuy, (2012) menciona que estas fundamentan la búsqueda de comportamientos estadísticamente regulares que se describen a continuación:

- Ley de productividad de los autores: demuestra la relación cuantitativa entre los autores y las contribuciones producidas en un campo dado a lo largo de un periodo de tiempo.
- Ley de dispersión de la bibliografía científica: Explica que no todas las publicaciones son igual de consultadas, y este consumo se mide por el volumen de acceso a los documentos o a partir de las citas que cada uno recibe.
- Ley de crecimiento exponencial: Como lo dice el enunciado, se refiere al crecimiento de la información científica que se produce de manera exponencial, donde cada 10-15 años la información se duplica.
- Ley de obsolescencia de la bibliografía científica: Se menciona que, así como hay un crecimiento exponencial de la información, también esta pierde actualidad cada vez más

rápidamente, y aunque no es uniforme para todas las disciplinas, en el caso de la bioquímica es muy rápida en contraste con otras ciencias.

Otro aspecto importante a la hora de hacer la bibliometría a parte de las leyes, son los indicadores bibliométricos, que “permiten expresar cuantitativamente las características bibliográficas del conjunto de documentos estudiados, así como las relaciones existentes entre estas características” (Ardanuy, 2012):

- Indicadores personales: son características de los autores como edad, sexo, posición profesional, país, afiliación institucional etc.
- Indicadores de producción: Se obtienen a partir del recuento de publicaciones científicas.
- Indicador de dispersión: Determina que publicaciones constituyen el núcleo de la disciplina (aquellas que acumulan el 50% de las citas).
- Indicador de visibilidad o impacto: Miden la influencia de los autores y de los trabajos publicados. De aquí surge el factor de impacto (FI) y el índice h.
- Indicadores de colaboración: mide las relaciones entre los productores científicos que han terminado con una publicación conjunta; también estudia la co-citación.

Teniendo en cuenta el fundamento de la bibliometría, una vez se tienen los datos cuantitativos (estadísticas) se continúa con sus análisis a partir del análisis bibliométrico (BA), que permitirá ya como tal determinar y comprender las tendencias de investigación actuales e históricas globales en un área específica (Macías-Quiroga et al., 2021), pues da cuenta del ritmo acelerado de la producción científica, sus regularidades, los países e instituciones contribuyentes y los temas más tratados (Gregorio-Chaviano et al., 2020); por lo que esta herramienta es muy útil para hacer pronósticos, encontrar nuevos nichos de investigación y mejorar en la toma de decisiones a la hora de iniciar un trabajo de investigación.

El análisis bibliométrico parte de los datos cuantitativos de la bibliometría y les otorga una interpretación cualitativa, es así como difiere de un artículo de revisión en cuanto a que su principal objetivo es dar cuenta de los avances en la producción científica, tendencias, irregularidades, desafíos y direcciones futuras de un determinado tema (Gregorio-Chaviano et al., 2020; Md Khudzari et al., 2018).

5.2 Normas AENOR:

AENOR es una entidad normalizadora española que se encarga sobre la vigilancia tecnológica e inteligencias competitivas, y crea un compendio de normas estandarizadoras que “responden a la necesidad por parte de las organizaciones de lograr información con anticipación con respecto a los competidores, convertirlo en conocimiento, elaborar un conocimiento que sea relevante para el negocio y utilizarlo para alcanzar los objetivos” (Aldasoro et al., 2012).

Dentro de la serie de normas que establece, la norma UNE 166006:2011, la cual es la única que habla de la inteligencia competitiva y que bajo su vigilancia tecnológica se establece aquí como proceso ético y sistemático de recolección y análisis de la información destinada a la toma de decisiones (Aldasoro et al., 2012).

Las etapas establecidas en la norma UNE 166006:2011 se resumen en la Tabla complementaria 1.

5.3 ¿Cómo PROKNOW-C se convierte en un método para generar conocimiento a partir de la identificación de oportunidades en la búsqueda científica?

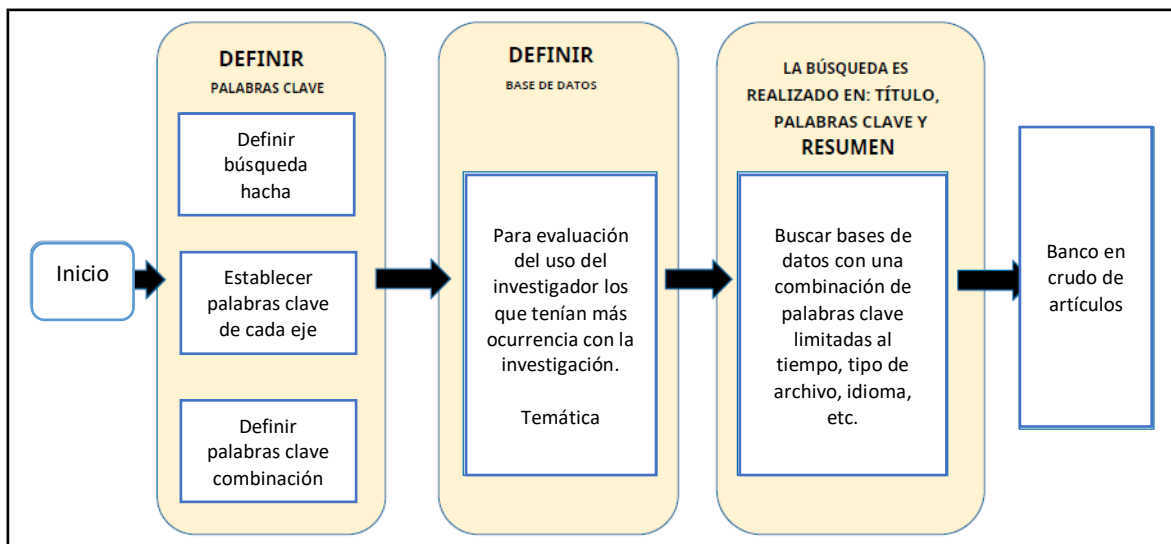
Como se describió anteriormente, la bibliometría es una herramienta sistemática que permite evaluar, cuantificar e interpretar el estado de la ciencia, rigiéndose por unas leyes e indicadores. Aunque, el método para realizar una bibliometría es libre, existe un método extendido actualmente

entre la comunidad científica llamado PROKNOW-C (Proceso de desarrollo del conocimiento – Constructivista), el cual “consiste en un proceso estructurado cuyo objetivo es generar conocimiento para un determinado investigador a partir de sus intereses y limitaciones según una visión constructivista” (Dutra et al., 2015). Para desarrollar la metodología se requiere que el investigador interactúe constantemente con el objeto de la investigación, ya que al revisar y saber lo que está publicado es más fácil y preciso identificar dónde se puede alinear y adherir la oportunidad de investigación, es decir dónde se puede intervenir y así contribuir a la ciencia y su aprendizaje; en ese sentido esta metodología se hace constructivista, en donde todo momento hay un proceso retroalimentado pre y post.

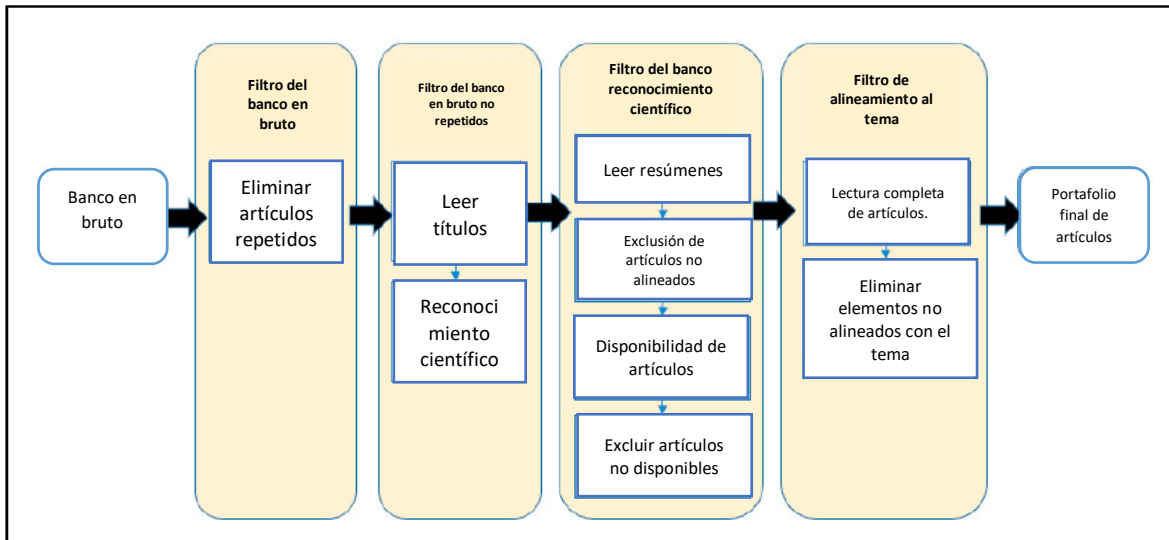
Este método surgió en el año 2005, aunque empezó a ser estructurado desde el año 2000 por el LabMCDA (Laboratorio de Metodologías Multicriterios para Apoyar la Decisión Constructivista) de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFC)-Brasil, como respuesta a la dificultad presente a la hora de conocer las oportunidades de investigación en la ciencia y las diferentes formas no tan rápidas en cómo se buscaba llegar a esta conclusión; en consecuencia partió de las diferentes formas que tenían en común estas búsquedas y las ordenó coherentemente. Es así como PROKNOW-C se cataloga como un método cualitativo haciendo que el proceso no sea replicable para todas las investigaciones, puesto que a medida que se hace la búsqueda el investigador va apropiándose y construyendo un tema de interés. Este concepto de constructivismo que se maneja no debe ser visto desde el término o enfoque filosófico sino empírico, pues se busca apoyar un proceso de gestión de un profesional específico haciendo un método que implica un análisis sistémico que muestra las lagunas en la investigación, apoyando la transparencia y legitimidad en este análisis.

A diferencia de un estado del arte, este método requiere de una selección de documentos que hablen cada vez más del tema de interés o de la duda de investigación, requiriendo así un análisis exhaustivo de artículos vigentes y delimitados, a lo que se le conoce como fragmento de literatura que irá formando un portafolio bibliográfico, en donde el investigador lo forme en función de su área de interés, observando y reconociendo los límites de los artículos que componen al portafolio de manera que se alineen con el tema de investigación (Linhares et al., 2019).

Ahora bien, este método cuenta con 4 etapas (Figura complementaria 2): selección del portafolio bibliográfico (Figura 1 a y b), bibliometría, análisis sistémico, y cuestión de la investigación (formulación de preguntas y objetivos de investigación) (Ensslin et al., n.d.); en cada etapa se hace una retroalimentación de la anterior, ya que por ejemplo en la medida que se busca, se encuentran nuevas palabras clave, que se vuelven a incluir en la búsqueda, y se vuelven a mirar la adherencia de las nuevas palabras a la investigación y así sucesivamente para cada etapa (Figura complementaria 3).



a.



b.

Figura 1. a. Fase 1 de la selección del portafolio bibliométrico. b. Filtrado del portafolio bibliométrico

Nota: Adaptado de (Vieira et al., 2019)

Más específicamente, la etapa 1 (selección del portafolio bibliográfico), consiste en buscar artículos en bases de datos referentes al tema de interés, donde se realiza una selección de artículos alineados con el tema de investigación (Linhares et al., 2019).

La etapa 2 (bibliometría), consiste en identificar las principales características del portafolio bibliográfico tales como: artículos más relevantes, artículos más citados, autores más relevantes, palabras claves y metodologías de evaluación del desempeño más utilizadas (Dutra et al., 2015 y Linhares et al., 2019).

En ese orden la etapa 3 (análisis sistémico), es “un análisis del contenido de los artículos del portafolio, utilizando lentes que ayudan en la construcción de la revisión de la literatura. Estos lentes pueden demostrar las lagunas en la literatura” (Linhares et al., 2019).

Finalmente, en la etapa 4 (cuestión de la investigación), una vez se hayan analizado los contenidos, se formula la pregunta de investigación.

5.4 Metagenómica y sus enfoques:

El término metagenómica fue acuñado en 1998 por Jo Handelsman refiriéndose a “investigación del material genético colectivo obtenido de una determinada muestra ambiental, que es, en principio, similar al de los genomas individuales de microorganismos cultivados” (Mardanov et al., 2018).

La metagenómica es una técnica o conjunto de técnicas que permite analizar y estudiar, de manera global, los genes de toda una comunidad microbiana (Garrido-Cárdenas & Manzano-Agugliaro, 2017), la cual puede estar presente en cualquier tipo de muestra como: agua, suelo, aire, en el interior de los seres vivos, productos de excreción, etc.

Desde que en 1970 Carl Woese sugirió al ARNr 16S como sistema comparativo filogenético universal para procariotas y al desarrollo en 1977 del método Sanger, se ha dado una revolución genómica en el campo de la ecología microbiana, puesto que mucha de la microbiota no cultivable ha podido ser descubierta y descrita (Mardanov et al., 2018); siendo hoy en día posible leer millones de secuencias de ADN masivamente en un tiempo y costo menor, gracias a los nuevos avances en las tecnologías se habla de una secuenciación masiva de próxima generación (NGS) que ofrece mayor capacidad de generación de datos.

El objeto de la metagenómica es poder caracterizar taxonómicamente una comunidad microbiana y ofrecer información relevante para la metatranscriptómica y metaproteómica, (Mardanov et al., 2018) de manera que se pueda ir “más allá del genoma” (Montaña, 2015), permitiéndose no solo conocer quienes están allí sino también poder entender qué están haciendo.

La diversidad microbiana se puede determinar usando dos enfoques en metagenómica que son: 1. la secuenciación de amplicones usando regiones específicas de ADN y cebadores RNAr 16S para procariotas o RNAr 18S y ITS o LSU para eucariotas y 2. la metagenómica de escopeta

que ayuda a reconstruir fragmentos (codificantes o no codificantes) grandes de genomas de una comunidad sin aislamiento previo, y se usa esta información para preparar bibliotecas completas de escopeta, en donde a través de un software se conecta con los metaperfiles y conocer sus perfiles metabólicos (Escobar-Zepeda et al., 2015) (Figura complementaria 5).

Teniendo en cuenta entonces los principios que rigen a la técnica, se pueden encontrar diferentes potencialidades de aplicaciones, como lo pueden ser en la salud, la biotecnología, la bioinformática, la bioquímica, entre otras. Actualmente esta ciencia ómica, ha empezado a ser muy utilizada en la biotecnología ambiental, para comprender efectos de ciertas sustancias tóxicas tanto en los seres humanos como en microorganismos expuestos a estas (cambios en genes, alteraciones metabólicas) (Hernández-Macedo et al., 2020).

5.5 Procesos Avanzados de Oxidación (AOP):

Son métodos usados para los procesos de tratamiento de aguas residuales que poseen contaminantes de difícil eliminación (orgánicos o inorgánicos), transformándolos en compuestos menos contaminantes o mineralizándolos por completo. Como lo menciona Capodaglio (2020), los procesos de oxidación avanzada son métodos de oxidación en fase acuosa, bien establecidos en el sector del agua, que actualmente se consideran de los más novedosos en procesos de tratamiento avanzados y que pueden estar en cierta parte comercialmente disponibles, e “implican la generación de radicales hidroxilos ($\text{HO}\bullet$) en cantidad suficiente para efectuar la purificación del agua.” (Deng & Zhao, 2015). Sin embargo, el “ $\text{HO}\bullet$ es no selectivo en su comportamiento y reacciona rápidamente con numerosas especies con constantes de velocidad del orden de $10^8 - 10^{10} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ” (Deng & Zhao, 2015); también se pueden utilizar otros radicales oxidativos como los sulfatos (SO_4^-)”.

Por otra parte, existen diferentes maneras de generar los radicales HO•, “incluida una combinación de agentes oxidantes (como H₂O₂ y O₃), irradiación (como luz ultravioleta o ultrasonido) y catalizadores (como iones metálicos Fe²⁺, o fotocatalizadores)” (Huang et al., 1993), más aún requiere de “tiempos de proceso prolongados para la degradación de los contaminantes, que van desde una fracción hasta varias horas para lograr al menos un registro de 1-log reducción de la masa de los contaminantes originales” (Capodaglio, 2020), en consecuencia, se han desarrollado modificaciones a la técnica, que dan respuesta a algunos de los inconvenientes que presentan los AOP; estos avances se conocen como: procesos de reducción avanzada (ARP), procesos de oxidación-reducción avanzados (AORP) y los procesos de tratamiento avanzado (ATP) (Figura complementaria 6).

5.6 Aguas Residuales

Las aguas residuales son residuos líquidos provenientes de los vertimientos de industrias o de origen doméstico principalmente, las cuales pueden variar en los volúmenes, la carga de materia orgánica, la carga de químicos presentes en estas aguas. Dentro de los vertimientos de origen doméstico se encuentran las aguas negras y las aguas grises, las primeras contienen una alta carga orgánica proveniente de sanitarios y lavaplatos, y la segunda tienen una baja carga orgánica provenientes de lavadoras, lavamanos, duchas etc, (Asano et al., 1990).

Las aguas residuales pueden contener contaminantes de diferente tipo, por ejemplo:

- Contaminantes biológicos patógenos: en este hay presencia de virus, bacterias, nematodos, platelmintos, los cuales producen enfermedades si se llega a consumir. “La diversidad de microorganismos que existen en las aguas residuales puede estar sujeta a fluctuaciones

importantes como resultado de cambios que ocurren naturalmente en el medio ambiente y en los organismos que lo habitan” (Bawiec et al., 2016).

- Contaminantes biológicos por desechos orgánicos: aquí encontramos residuos orgánicos producidos por los seres humanos, la agricultura y la ganadería; que pueden ser descompuestos por bacterias que utilizan el oxígeno para dicho proceso. Sí hay poblaciones grandes de estas bacterias, pueden agotar el oxígeno presente en el agua, afectando otras formas de vida acuática que dependen del oxígeno. En consecuencia, se tiene en cuenta el parámetro de oxígeno disuelto (OD) por la DBO, que determina “la cantidad de oxígeno utilizada por microorganismos no fotosintéticos para convertir compuestos orgánicos biodegradables en dióxido de carbono y agua”, (Bes Monge et al., 2018).
- Contaminantes inorgánicos: estos pueden estar presentes en el agua por diversos factores como la agricultura tras el uso de fertilizantes y pesticidas, sustancias vertidas en los procesos industriales, como lo pueden ser algunos colorantes de textiles, ácidos, sales, metales tóxicos, o contaminantes domésticos, provenientes del uso de detergentes y Jabones. Se encuentran entonces en el agua contaminantes inorgánicos como nitrógeno, fósforo y potasio, entre otros, lo que pueden ocasionar daños a los seres vivos y disminuir rendimientos agrícolas, hasta corroer equipos. En este caso el oxígeno disuelto en el agua es quien se encarga de oxidar algunos de estos contaminantes, generando una pérdida de oxígeno, que en este caso sea de manera química, para este parámetro se tiene en cuenta la DQO (demanda química de oxígeno), que “representa la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química de los compuestos orgánicos carbonados a dióxido de carbono y agua” (Bes Monge et al., 2018).
- Contaminación por sedimentos: las aguas residuales también pueden recibir sedimentos por procesos erosivos naturales, o por actividades de canteras y relacionadas con la construcción.

- Contaminación térmica: las aguas también pueden contaminarse cuando se liberan vertimientos con alta temperatura, es decir que el vertimiento esté caliente, en una mayor proporción que la que se encuentra en el efluente. Esto puede ocurrir sobre todo en procesos industriales, ocasionando que el cuerpo de agua disminuya su capacidad para contener oxígeno, y de ahí en adelante generar procesos de muerte de organismos acuáticos, entre otros problemas, típicamente la temperatura debe ser menor a 30°C (Bes Monge et al., 2018).

6. Estado del arte.

El campo de la bibliometría en las ciencias juega un papel crucial puesto que “da valor medible al resultado de dicha actividad científica; por consiguiente, se puede situar o comparar la creación de X institución, grupo investigativo, país, etc; en relación con otros” (Dávila Rodríguez et al., 2009), con el fin de servir de apoyo para la toma de decisiones y direcciones de las investigaciones; tal es el caso del presente trabajo, el cual pretende determinar el crecimiento y tendencias de investigaciones publicadas entre 2004 y 2022, que involucran la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas.

En ese sentido, los estudios bibliométricos referentes a la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas, son nulos, más aún se encuentran trabajos bibliométricos en torno a la eliminación de contaminantes emergentes en plantas de tratamientos de aguas como lo expone Costa et al., (2021), o análisis bibliométricos sobre el tratamiento de micro plásticos en tratamiento de aguas residuales por Palmas et al., (2021).

Para el primer trabajo, los autores, realizan una revisión bibliográfica de literatura sobre la eliminación simultánea de contaminantes de preocupación emergente y matrices de aguas residuales domésticas (Costa et al., 2021), en los últimos 10 años (del 2008 al 2009), y usando un análisis sistémico para que la información no estuviera sesgada, construyeron un portafolio bibliométrico. Para desarrollar este análisis usaron como método a ProKnow-C, siguiendo las etapas concretamente como establece el Laboratorio de Metodologías Constructivistas de Ayuda a la Decisión—LabMCDA-C / UFSC de la Universidad Federal de Santa Catarina. Usaron 5 lentes para el análisis de los artículos seleccionados y al final plantearon preguntas específicas que orientaron las futuras investigaciones referentes al tema. Dentro de los softwares de análisis que usaron esta Vosviewer, que les permitió realizar redes de palabras más citadas (coocurrencias);

Excel, para representar en graficas de barras los compuestos más citados, las tecnologías más presentes en el tratamiento de aguas y el número de artículos encontrados de acuerdo con las combinaciones de búsqueda. Como parte de sus resultados y conclusiones mencionan que se han destacado la eliminación en simultaneo de los contaminantes de preocupación emergente junto con patógenos en las aguas residuales, especialmente de los antibióticos y de las bacterias resistentes a antibióticos; así mismo, como parte de los AOP más usados en esto se encuentran los de ozonización; a su vez, mencionan una “falta de información asociada con la evaluación simultánea de la remoción y desinfección de los contaminantes de preocupación emergente en muestras reales y en matrices de aguas residuales provenientes de diferentes tecnologías de tratamiento secundario en diversas ubicaciones” (Costa et al., 2021).

El segundo trabajo, consistió en un análisis bibliométrico de los artículos dedicados a los micro plásticos en el tratamiento de aguas residuales, para ello se enfocaron en identificar los sectores a los que se podría dirigir la investigación. Usaron como base de datos a SCOPUS del 2010 al 2022, y el software Vosviewer; este último de gran importancia para los autores ya que establecieron relaciones entre países, revistas, organizaciones, autores y palabras clave, con el tema y subtemas relacionados. Igualmente, usaron Excel para conocer las relaciones entre los tipos de documentos publicados por años, las tendencias de ocurrencia de las principales palabras clave en los años. Concluyen especificando que el principal problema de los micro plásticos se da en el medio marino, y que actualmente se ha prestado a las plantas de tratamiento de aguas municipales y depuradoras de lodos como posibles vías de entrada de micro plásticos al medio acuático; sin embargo, hay una gran brecha en las posibles técnicas de degradación de estos micro plásticos y derivados.

Ahora bien, partiendo del echo de la nula referencia bibliográfica sobre estudios bibliométricos concernientes a la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas, y de los dos antecedentes más cercanos a estudios bibliométricos sobre tratamiento de aguas antes descritos, a continuación, se muestran los principales estudios que abordan la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas, fuera del contexto bibliométrico:

- ✓ Martínez-Pachón et al., (2021), evaluaron el tratamiento real de efluentes de aguas residuales en Colombia a través del proceso fotoelectro-Fenton; para ello, tomaron varios afluentes de Bogotá con la aparición de familias de bacterias relacionadas a enfermedades transmitidas en los alimentos (*Pseudomonadaceae*, *Campylobacteraceae*, *Aeromonadaceae*, *Enterobacteriaceae* y *Bacteroidaceae*) y productos farmacéuticos presentes en las aguas municipales (azitromicina, carbamazepina, ciprofloxacina, claritromicina y diclofenaco, principalmente). Para poder determinar las familias de bacterias causantes de riesgos ambientales se usó la técnica de la metagenómica vía escopeta, la cual permitió evaluar la extensión del proceso fotoelectro-Fenton en los cocientes de riesgo, degradación total del ADN y evolución de la mineralización en las bacterias. Como parte de sus resultados con el sistema fotoelectro-Fenton, se obtuvo la inactivación casi completamente de los microorganismos (aprox >85%) después de sólo 5 minutos de electrólisis, en contraste con solo la exposición a la luz UVA; igualmente en el estudio de las vías del proceso se encontró que en la degradación de los fármacos y microorganismos se generan radicales hidroxilo y cloro que continúan atacando y generando en los fármacos coeficientes de riesgos ambientales más bajos. Uno de los aportes significativos también está en que, aunque el ion de hierro se consuma en parte en

el proceso, la luz y el agua ayuda a que se reduzca, y se regenere en forma ferrosa para que pueda seguir trabajando.

- ✓ Como parte de los procesos de tratamiento de los mismos componentes recalcitrantes en aguas residuales (fenólicos y aromáticos), en el trabajo de Zhang et al., (2021) trabajó simultáneamente con procesos fotocatalíticos y biológicos, los cuales demuestran una mayor sinergia que si se trabajaran de manera individual, todo esto en un solo sistema acoplado. El principio del sistema consiste en, primero transformar los intermedios biodegradables por fotocatalisis y luego dejar que sean metabolizados por los microorganismos. Para evitar que el proceso de fotocatalisis superoxide y genere compuestos intermedios más tóxicos, ellos proponen que esta debe estar físicamente cerca del proceso de biotransformación.

Además, como parte de sus resultados establecen que el tipo de sistema acoplado poroso es una buena opción para evitar la muerte microbiana por la luz UV y los ataques de los radicales fotogenerados, sin embargo, las comunidades microbianas aquí adquieren un papel significativo para la degradación de los compuestos, y no se consideran como agentes contaminantes. Por lo anterior, sería pertinente profundizar en los tipos de familias presentes en estas comunidades microbianas que favorecen el proceso de degradación, como también para conocer si estas podrían propagarse en el agua y generar algún tipo de enfermedades en humanos. Es aquí donde se puede visualizar el potencial de la técnica de metagenómica que puede permitir dilucidar la proporción y tipo de microorganismos útiles en el proyecto.

- ✓ De manera similar al trabajo anterior, Aboudalle et al., (2021) abordan un acople entre el proceso electro-Fenton y uno biológico avanzado para eliminar un compuesto farmacéutico

(metronidazol), de manera que se mejorara su mineralización; sin embargo, aquí sí se evidencian los tipos de microorganismos usados en el proceso, como *Pseudomona putida* y *Achromobacter sp.* El proceso biológico avanzado consistió en usar tanto la bioaumentación como la bioestimulación, en donde la primera consiste en añadir microorganismos específicos de una comunidad autóctona de la solución y la segunda en agregar nutrientes o aceptores de electrones para mejorar la degradación. En los procesos se requirió de una aclimatación de las cepas en los subproductos de la electrólisis donde se alcanzaron niveles de mineralización del 75% y el 72% después de 120h.

El acople generó un rendimiento de mineralización del 97%, reduciendo el proceso en 16 días, comparado con el tratamiento anterior. Por su parte el uso de lodos activados fueron una fuente importante para obtener cepas puras para degradar, las cuales demuestran que hay una menor efectividad en la cepa pura que en la comunidad microbiana presente en los lodos. Por lo anterior sería de gran utilidad, poder establecer los tipos de familias presentes en estos lodos usando la metagenómica y vincularlos con AOP, de manera que se pueda determinar el conjunto de microorganismos útiles en la degradación de fármacos semejantes al metronidazol.

Dentro de otras investigaciones semejantes a la anterior sobre los AOP aplicados a aguas residuales, se encuentran las de Deng & Zhao, (2015) y Capodaglio, (2020).

La metagenómica se encuentra inmersa en muchos ámbitos como bien se dijo en el apartado anterior, más aún su injerencia en la biotecnología y el tratamiento de aguas residuales, está en pleno desarrollo, involucrando diferentes tipos de tecnologías complementarias y novedosas a los procesos convencionales. Inicialmente el análisis metagenómico es fundamental para determinar el tipo y la efectividad del tratamiento de

las aguas residuales, ya que se deben conocer las vías metabólicas que pueden verse inmersas en el sistema tecnológico y que permitan la mejora en la calidad del agua.

- ✓ Es así como Cydzik-Kwiatkowska & Zielińska, (2016) desarrollaron una investigación de cómo las comunidades bacterianas pueden ser aplicadas en la mejora de la eficiencia y estabilidad de las aguas residuales, proveyendo de datos sobre los tipos de metabolismos en bacterias como las nitrificantes, desnitrificantes, bacterias Anammox, y bacterias acumuladoras de fosfato y glucógeno, los cuales se obtuvieron a partir de técnicas moleculares; junto con esta información también trabajaron con la composición microbiana en lodos de las plantas de tratamientos de aguas residuales, para poder determinar cuáles son aquellas que permiten la eliminación de antibióticos y microcontaminantes.
- ✓ Gaur et al., (2018) trabajaron sobre los avances recientes en la biorremediación de contaminantes orgánicos persistentes y su efecto en el medio ambiente, haciendo una revisión sobre diferentes procesos de descontaminación de aguas, haciendo hincapié en los AOP para el tratamiento de aguas residuales los cuales eliminan eficazmente los contaminantes orgánicos recalcitrantes, inclusive disminuyendo su concentración de cientos de ppm a 5ppm. Los estudios estudiados por los autores demostraron que con AOP, los contaminantes orgánicos se descomponen y se vuelven más pequeños y pueden ser fácilmente biodegradables. Al mismo tiempo, los autores ahondan en cada una de las particularidades de los AOP y sus eficiencias por separado, pero no deja de lado el papel que tiene la metagenómica para la evaluación de estos procesos de tratamientos de aguas sobre la base del RNAr16S que según los estudios trabajados permitió identificar comunidades bacterianas en donde algunas de ellas mostraron mayor degradabilidad de xenobióticos y algunos genes están asociados con rutas metabólicas para tal degradación.

Identifican en los estudios que gracias a la metagenómica se ha podido encontrar comunidades bacterianas capaces de degradar compuestos aromáticos, también cómo evolucionan los genes de estradiol dioxigenasas. Concluyen mencionando la importancia de trabajar con enfoques sinérgicos para el tratamiento de aguas residuales, en donde el papel de la metagenómica se hace relevante para poder aislar, caracterizar y purificar enzimas que sean de utilidad en la biorremediación, pero también para poder determinar la efectividad de los AOP, como de otros tratamientos de aguas.

- ✓ Hou et al., (2019), construyeron un reactor de tratamiento de aguas residuales farmacéuticas a escala de laboratorio con lecho de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) para eliminar antibióticos y ARG, utilizaron 4 procesos por separados de AOP (UV, Ozonización, Fenton y Fenton/UV) para eliminar 18 antibióticos y 10 ARG de aguas residuales farmacéuticas reales. Dentro de los resultados obtenidos, todos los antibióticos fueron completamente eliminados después de 180 días, mientras que hubo una disminución substancial de ARG (reducción logarítmica de 0,1 a 3,1 veces). El AOP más eficaz para eliminar los ARG fue Fenton/UV. El análisis usado para establecer dichos resultados fue usar cromatografía líquida ultraalta/espectrometría de masas por electropulverización (UPLC/ESI-MS/MS) en modo de iones positivos utilizando WATERS ACQUITY UPLC y XEVO TQ MS para los 18 antibióticos y la cuantificación del gen RNA16S y 10 ARG (sul 1, sul 2, tet O, tet Q, tet M, tet W, qnr D, erm B, bla_{OXA-1} y bla_{OXA-10}) a partir de PCR.
- ✓ Lu et al., (2015b), realizaron un análisis metagenómico usando pirosecuenciación de alto rendimiento de Illumina para investigar los patógenos bacterianos y su posible virulencia en una planta de tratamiento de aguas residuales aplicando tratamientos de aguas convencionales y avanzados. Tomaron tres muestras tanto de aguas residuales como de

lodos de la depuradora. Usaron el gen RNAr16S, el cual se amplificó con un conjunto de cebadores dirigidos a las regiones hipervariables V3-V4. Para identificar el gen RNAr16S las secuencias se alinearon con la base de datos Silva usando BLASTN. También se usaron genes indicadores específicos para cuantificar cuatro patógenos (gen uidA) de *Escherichia coli*, (gen lip) de *Aeromonas hydrophila*, (gen gyrA) de *Arcobacter butzleri*, y (gen phoE) de *Klebsiella pneumoniae*. Dentro de los resultados obtenidos está que el género *Arcobacter* era el más abundante del total de patógenos potenciales (43,42%), mientras que a nivel de especies los patógenos potenciales fueron: *Arcobacter butzleri*, *Aeromonas hydrophila* y *Klebsiella pneumoniae*; del mismo modo también se encontraron islas de patogenicidad y proteínas de virulencia, sin embargo la mayoría de estos patógenos potenciales y factores de virulencia fueron eliminados en los tratamientos de aguas avanzados, ya que esto dependió principalmente de las zanjas de oxidación. Finalmente, y aun con los tratamientos avanzados, persiste *A. butzleri* y debe encontrarse el mecanismo idóneo para su completa degradación.

Sumado a esta investigación también hay muchas otras que aportan al proyecto y abordan la metagenómica con los AOP, como las de, Gilbride et al., (2006), Torres Andrade, (2014), Garrido Cárdenas et al., (2017); y a la metagenómica como facilitadora de la evaluación en los procesos de tratamiento de aguas residuales como las de: Amos et al., (2014), Evers et al., (2004), Ferro et al., (2015); Lin et al., (2014), Yang et al., (2014), Rodríguez-Chueca et al., (2019), (J. Wang & Chen, 2020), F. Wang et al., (2017), Ahmed et al., (2021), entre otros.

7. Hipótesis

Los artículos enfocados en el tratamiento de aguas que integran los procesos avanzados de oxidación con la metagenómica, tienen un reciente desarrollo que muestra la potencialidad de ambos campos en conjunto para evaluar la eficiencia de los AOP en la eliminación de ARB y ARG; por lo que el número de artículos, países y autores presentan un crecimiento en los últimos 5 años.

8. Objetivos

8.1 Objetivo General:

Realizar un estudio bibliométrico para establecer la aplicabilidad de la metagenómica como herramienta de apoyo a los estudios de evaluación de diferentes AOP aplicados al tratamiento de aguas en los últimos años.

8.2 Objetivos Específicos:

- Establecer los indicadores bibliométricos más relevantes de los artículos delimitados en el portafolio bibliográfico a partir de la búsqueda en las bases de datos Scopus y WoS.
- Analizar los datos obtenidos, principalmente la distribución temporal y geográfica, los actores más influyentes y el grado de madurez de la investigación.
- Describir el comportamiento estadístico de la información y del análisis.

9. Diseño Metodológico

9.1 Características generales de la investigación:

La investigación tiene un enfoque cuantitativo porque se establecen valores medibles en los resultados de la producción científica en torno a la relación entre metagenómica con los AOP aplicados en el tratamiento de aguas. Adquiriendo un alcance descriptivo y correlacional, tras el contraste, análisis e interpretación de la información recabada. Sin embargo, al implementar un método como ProKnow-C, se considera también abordar un aspecto cualitativo porque se logra identificar los nichos de investigación y perspectivas a futuro delimitando las búsquedas con las diferentes combinaciones.

Para lo anterior se tomó de referencia la ruta metodológica propuesta por UNE 166006:2011 de la entidad AENOR y el método Knowledge Development Process-Constructivist (Proknow-C). Los datos recopilados se procesaron en gráficas de correlación, tendencias y co-ocurrencia, y se analizaron mediante estadística descriptiva.

La técnica de investigación aplicada fue el análisis documental, porque mediante este se identifican y describen, los diferentes avances, tendencias y frecuencias que se tienen de la metagenómica como herramienta aplicada en conjunto con los procesos de oxidación avanzada para explicar los aportes y retos que traen en la descontaminación de aguas. Por lo tanto, este análisis documental se basó en el trabajo de archivo, que consiste en la obtención de información a través de fuentes escritas y gráficas (Martínez, 2018).

Adicionalmente como instrumento de investigación se aplicó, el análisis bibliométrico, que permitió responder las preguntas de interés del presente trabajo como: ¿Cuál es el número de investigaciones en el mundo durante los últimos 18 años que involucran la metagenómica

con los AOP aplicados al tratamiento de aguas?, ¿Cómo se distribuyen las investigaciones por continentes y países?, ¿Cuáles son los artículos con mayor reconocimiento científico?, entre otras.

9.2 Desarrollo metodológico:

9.2.1. Selección del portafolio

En esta primera etapa se identificó y delimitó el tema de investigación según la revisión de la literatura científica publicada (Figura 2), esto se realizó en los siguientes subpasos:

- a) Definición de palabras clave: para la selección de palabras clave se usaron 4 ejes de investigación (sistemas biológicos, metagenómica, procesos avanzados de oxidación y tratamientos de aguas) que respondían a una primera búsqueda de alineación al tema de investigación. Una vez se revisaron el número de artículos arrojados y un primer paneo general de la información en bases de datos (Scopus y WoS), se delimitó aún más (definición hecha) escogiendo las palabras clave dentro de sus ejes, las cuales incluyeron 6 palabras clave y 10 sinónimos (Tabla 1).

Tabla 1. Ejes de búsqueda y palabras clave

| Ejes de busqueda | Keywords | Relaciones/sinónimos |
|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Biological systems | Biological reactor | Biorreactor |
| | Biological reactor | Microbial degradation |
| Metagenomic | Metagenomic | Community genomic |
| Advanced oxidation processes | Advanced oxidation processes | AOP |

| | | |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Advanced oxidation processes | Advanced oxidation processes | Advanced oxidation technology |
| Advanced oxidation processes | Pollutant degradation | Pollutant removal |
| Advanced oxidation processes | Pollutant degradation | Pollutant elimination |
| Advanced oxidation processes | Pollutant degradation | Xenobiotic elimination |
| Advanced oxidation processes | Pollutant degradation | Contaminant elimination |
| Water treatment | Tertiary treatment | Wastewater treatment |
| Water treatment | Tertiary treatment | Water purification |
| Water treatment | Wastewater treatment | Sewage treatment |

Nota: Las palabras se usaron en inglés teniendo en cuenta que los artículos buscados estaban en inglés.

Las anteriores palabras y sus sinónimos, se emplearon en una búsqueda preliminar de artículos científicos de investigación y de revisión (reviews)) usando combinaciones entre dos palabras clave y sus sinónimos, y de tres palabras clave y sus sinónimos, usando los correspondientes operadores booleanos AND y OR, con el objetivo de encontrar estudios que involucran la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas. Los sinónimos se seleccionaron de palabras que las relacionaban en los artículos revisados, con ayuda de software y tesauros. En total se obtuvieron 25 combinaciones (Tablas 2 y 3).

Tabla 2. Ecuaciones de búsqueda entre dos palabras clave y sus sinónimos.

| Ecuaciones de búsqueda: “Biological reactor” | Ecuaciones de búsqueda: “Metagenomic” | Ecuaciones de búsqueda: “advanced oxidation processes” | Ecuaciones de búsqueda: “pollutant degradation” | Ecuaciones de búsqueda: “Tertiary Treatment” |
|---|---|--|---|---|
| ("biological reactor" OR "biorreactor" OR "microbial degradation") AND ("metagenomic" OR "community genomic") | ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") | ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") AND ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") | ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") AND ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") | ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") AND ("wastewater treatment" OR "Sewage treatment") |
| ("biological reactor" OR "biorreactor" OR "microbial degradation") AND ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") | ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") | ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") AND ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") | ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") AND ("wastewater treatment" OR "Sewage treatment") | |
| ("biological reactor" OR "biorreactor" OR "microbial degradation") AND ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") | ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") | ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") AND ("wastewater treatment" OR "Sewage treatment") | | |
| ("biological reactor" OR "biorreactor" OR "microbial degradation") AND ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") | ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("wastewater treatment" OR "Sewage treatment") | | | |

Tabla 3. Ecuaciones de búsqueda entre tres palabras clave y sus sinónimos.

| "Biological reactor AND Metagenomic AND ..." | "Metagenomic AND Advanced oxidation processes AND..." | "Advanced oxidation processes AND pollutant degradation AND..." | "Pollutant degradation AND Tertiary Treatment AND..." |
|--|---|---|--|
| ("biological reactor" OR "biorreactor" OR "microbial degradation") AND ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") | ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") AND ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") | ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") AND ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") AND ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") | ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") AND ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") AND ("wastewater treatment" OR "Sewage treatment") |
| ("biological reactor" OR "biorreactor" OR "microbial degradation") AND ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") | ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") AND ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") | ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") AND ("pollutant degradation" OR "pollutant removal" OR "pollutant elimination" OR "xenobiotic elimination" OR "contaminant elimination") AND ("wastewater treatment" OR "Sewage treatment") | |
| ("biological reactor" OR "biorreactor" OR "microbial degradation") AND ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("Tertiary Treatment" OR "wastewater treatment" OR "Water Purification") | ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("advanced oxidation processes" OR "AOPs" OR "advanced oxidation technology") AND ("wastewater treatment" OR "Sewage treatment") | | |
| ("biological reactor" OR "biorreactor" OR "microbial degradation") AND ("metagenomic" OR "community genomic") AND ("wastewater treatment" OR "Sewage treatment") | | | |

b) Definición de bases de datos: Todas las combinaciones (Tabla 2 y 3) se utilizaron para hacer un banco de artículos en bruto, partiendo de una búsqueda preliminar en las bases de datos SCOPUS y WoS. Estas bases de datos se seleccionaron porque ofrecían un alineamiento en el área de conocimientos en ciencias químicas, ambientales y microbiológicas, además son bases extensas de literatura en estas áreas y tienen documentos de alto impacto a nivel mundial pues “abarcan el 95% de las publicaciones en el mundo” (Macías-Quiroga et al., 2021); dicho esto, se verificó igualmente por la herramienta de Google trends (Figura complementaria 7).

Así mismo, estas bases de datos permitieron obtener un alcance de artículos refinados y filtrados con el uso de criterios de selección como: año, área temática, tipo de documento, estado de publicación, título de la fuente, idioma entre otras.

c) Búsqueda de artículos: Para la búsqueda en ambas bases de datos con las combinaciones de las palabras clave se usaron los campos de búsqueda: título, resumen y palabras clave, en un rango de tiempo de 2004 a 2022, este periodo se seleccionó porque el desarrollo de la metagenómica es de reciente aparición y por consiguiente no se encontrarían artículos que la incluyeran en años anteriores y que fueran de aplicación en AOP. Los tipos de archivos que se tuvieron en cuenta fueron los artículos científicos ya publicados y artículos de revisión, en inglés y español. Las categorías de limitación fueron: Ciencias ambientales, bioquímica, genética y biología molecular, química, ingeniería, ingeniería química, agricultura y ciencias biológicas, agricultura multidisciplinaria, recursos acuáticos, ingeniería ambiental, estudios ambientales, bioquímica molecular.

d) Prueba de adherencia de las palabras clave: Una vez realizadas las búsquedas se seleccionó un banco de artículos en bruto, seguidamente se evaluó la adherencia verificando si se

requerían incluir nuevas palabras clave en la búsqueda o cambiarlas orientando la búsqueda a la aplicación de la metagenómica con los AOP. Para lo anterior se cambió “microorganisms” cambiada luego por “microbial degradation”, “wastewater” cambiada por “wastewater treatment”, se eliminó la palabra “coupled” y se agregaron nuevos sinónimos como: “xenobiotic elimination”, “Biorreactor”, “pollutant removal”, “pollutant elimination” entre otros, dejando las palabras clave y sinónimos en la Tabla 1.

También se buscaron todas las combinaciones de las palabras clave hasta que un número factible (100-500) de escritos las incluyeron en su título y resumen, donde las palabras clave de al menos 2 artículos seleccionados al azar se encontraran en el banco de las palabras clave o sus sinónimos, si no se obtenían los suficientes resultados se repetía la búsqueda con una combinación diferente. Del mismo modo, se tuvo en cuenta para la selección, las ideas generales de los artículos (a partir de una revisión de título, resumen, metodología y gráficos), la disponibilidad de los artículos (para números de 1000 o más artículos se hizo un filtro adicional de solo artículos de acceso libre).

e) Filtro de artículos por redundancia y alineación: Posteriormente se filtraron aún más según su redundancia y repetición mediante Excel, eliminando los artículos que no se alineaban al tema de investigación.

Adicionalmente, se realizó la lectura completa de los artículos y se seleccionaron finalmente 43 artículos que conformaron el portafolio primario (Tabla 3).

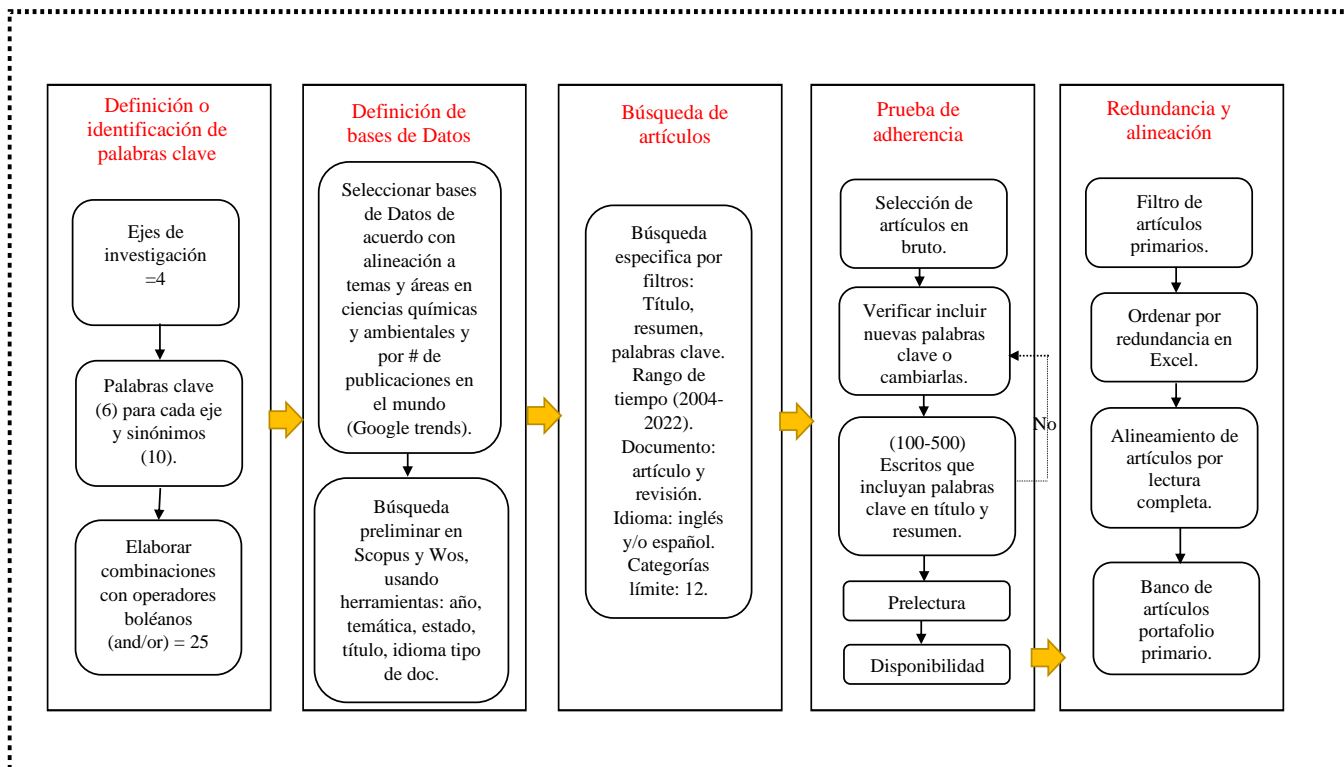


Figura 2. Proceso metodológico de selección de artículos

9.2.2. Análisis bibliométrico

Los documentos del portafolio bibliográfico primario se ordenaron en Excel de acuerdo con el número de citas de cada uno de ellos teniendo en cuenta lo registrado en Scopus y WoS. Con esta información se estableció un valor de corte para los artículos más citados (85%, según lo establecido en la metodología PROKNOW-C). Teniendo en cuenta el postulado de Parapeto (1896) mencionado por Oliveira Lacerda et al., (2012), el cual establece que una pequeña minoría de la población representa a la mayoría de la población (en otras palabras, quiere decir la muestra mínima de la población que representa un nivel de confianza de la población), “significa que, si la investigación selecciona la minoría de

los artículos más citados, estos representan la mayoría del reconocimiento científico presente en el conjunto actual de artículos” (de Oliveira Lacerda et al., 2012).

Para el caso de los artículos menos citados fueron sometidos a un proceso de análisis bajo otros criterios:

- I. Artículos publicados de menos de 2 años después del análisis pueden ser incluidos, porque aún no han tenido la posibilidad de ser bien citados (forman el portafolio A).
- II. Los artículos publicados de hace más de 2 años donde sus autores estén presentes en uno de los artículos del portafolio A.

Después de verificar que los artículos seleccionados estuvieran disponibles en su totalidad, se procedió a releerlos para determinar su alienación con el tema de investigación. Con este proceso se estableció el portafolio final o secundario (Figura 3). A su vez, estas lecturas plantearon las siguientes preguntas que orientaron los resultados bibliométricos:

- ¿Cuál es el número de investigaciones en el mundo durante los últimos 18 años que involucran la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas?
- ¿Cómo se distribuyen las investigaciones por continentes y países?
- ¿Cuáles son los artículos con mayor reconocimiento científico?
- ¿Cómo se estructura la red de cooperación entre autores?
- ¿Cómo se distribuyen los autores en las redes?

- ¿Qué palabras clave se han usado con más frecuencia entre 2004-2022 en investigaciones que involucran la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas?
- ¿Cuáles fueron las áreas temáticas de interés en el tema de investigación?
- ¿Cuáles son los enfoques más destacados de estudio en las investigaciones?

Una vez establecido el portafolio final o secundario, los artículos fueron tratados y analizados usando para ello el programa VosViewer que permitió representar mapas específicos (redes) en donde los nodos (etiquetas) representan los elementos investigados que están conectados entre sí por enlaces y organizados según la interacción entre ellos. También se usó los mapas de densidad, en donde los colores indican cómo se distribuyen los nodos en el espacio (cuanto más densa es el área, más relacionados entre sí están los elementos incluidos en el mismo).

Ahora bien, para este trabajo, se realizaron los siguientes análisis:

- Análisis de crecimiento exponencial: Se midió el número de documentos por año publicados sobre el tema, luego se compararon los años más productivos y las tendencias de publicación dentro del tema. Este análisis responde a la ley de crecimiento exponencial bibliométrico. Aunado se hizo el análisis del crecimiento de publicaciones por países (global), determinando las relaciones entre el número de publicaciones por país, tendencias de estudio dentro del tema y contextos socioambientales de estos países.
- Análisis del reconocimiento científico: Se entiende como el número de artículos que presentan más citas (para este caso de 26 o más). Con este análisis se responde a la ley de dispersión de la bibliografía científica, estableciéndose qué artículos aportan más

reconocimiento del total de artículos incluidos en la bibliometría, y a su vez reflejan los intereses principales de la comunidad científica.

- **Análisis de Co-ocurrencias:** Este es basado en el número de veces que las palabras clave son repetidas en varios artículos. Estas palabras pueden ser ya sea las indicadas por los autores o genéricas indexadas en los temas específicos (resumen, título o ambos). En las gráficas, cuanto mayor es la ocurrencia, mayor será el tamaño del nodo. El grosor del enlace indica el número total de veces que las dos palabras se han considerado conjuntamente como palabras clave en varios artículos (fuerza total del enlace).
- **Análisis de Co-Autorías:** Semejante al análisis anterior, en este caso los nodos del mapa fueron los nombres representativos de los autores de los artículos. La relación está determinada por el número de artículos en coautoría de cada pareja de autores.

Para el caso de los colores de los ítems en los mapas tanto para el análisis de Co-ocurrencias y Co-autorías pueden estar relacionados ya sea al grupo al que se refiere el artículo o al promedio del año de publicación de los artículos que contienen determinadas palabras clave.

Del mismo modo, se usó el programa Excel para las gráficas de análisis estadístico de publicaciones globales, publicaciones por año, reconocimiento científico, y también se usó las herramientas de análisis que ofrece SCOPUS y WoS para establecer las áreas temáticas de aparición de los artículos en ambas bases de datos.

10. Resultados y análisis de resultados

10.1 Selección del portafolio:

En la búsqueda preliminar con las combinaciones de las palabras clave iniciales se obtuvo una masa de 90.481 artículos para Scopus y 37.943 artículos para WoS, aplicados los filtros, mostrando una representatividad en números de artículos que ofrecen ambas bases de datos (en la búsqueda esta masa de artículos se formó el banco de artículos en bruto). Después de las pruebas de adherencia, se obtuvo un total de 12.606 artículos de Scopus y 9.531 de WoS; luego de ser filtrados por redundancia y/o repetición se obtuvo un total de 110 artículos para SCOPUS y 16 artículos para WoS, obteniendo así los artículos que estaban alineados al tema de investigación. Tales cambios significativos después de la filtración por redundancia y alineamiento, se debió principalmente a que las bases de datos tienen un lenguaje estructurado de consulta (combinaciones booleanas), donde pueden relacionar el mismo dato para diferentes tipos de combinaciones que incluyen palabras semejantes en cada uno de los filtros (título, resumen, palabras clave); asimismo ambas bases de datos usadas, agrupan una gran cantidad de revistas científicas de diferentes áreas, y por ende en ambas se podían encontrar algunos datos repetidos. Para el caso de Scopus donde se obtuvo una mayor cantidad de artículos en comparación de WoS, se debe principalmente a que el índice de citas por artículo global es mayor que en esta última, y adicionalmente Scopus presenta un factor de impacto e índice h (que refleja la influencia a largo plazo de una publicación) en correlación de 0.79, mientras que para WoS es de 0.17, también se explica esto ya que Scopus tiene más revistas que permiten publicar artículos en un idioma diferente al inglés que WoS (Hernández-González et al., 2016), lo que significa que hay un mayor número de artículos disponibles en habla castellana que aportan mayor número de artículos para este trabajo.

Ahora bien, con la lectura de los 126 artículos se seleccionaron en total 43 artículos alineados y que conformaron el portafolio bibliográfico primario (Tabla complementaria 2).

10.2 Análisis Bibliométrico:

A partir de la investigación realizada en Google Academic para verificar el reconocimiento científico de los artículos, se observó que la suma de las citas de los 43 artículos analizados fue de 1412. Los artículos que fueron citados individualmente 23 veces o más, representaron 1196 citas, es decir el 84,7% del total de citas de los 43 artículos hasta ese momento seleccionados (portafolio primario), resultando en 15 artículos (repositorio A); con el análisis de los otros artículos del portafolio primario, se sumaron 22 artículos que tienen menos de dos años de realizado el análisis y de los 6 artículos que se publicaron antes del 2020 (repositorio B), solo uno es de autor presente en el portafolio final del repositorio A. Así, de los 43 artículos seleccionados del portafolio primario, se obtuvieron en el análisis bibliométrico 38 artículos, que formaron el portafolio bibliográfico final o secundario (Tabla 4).

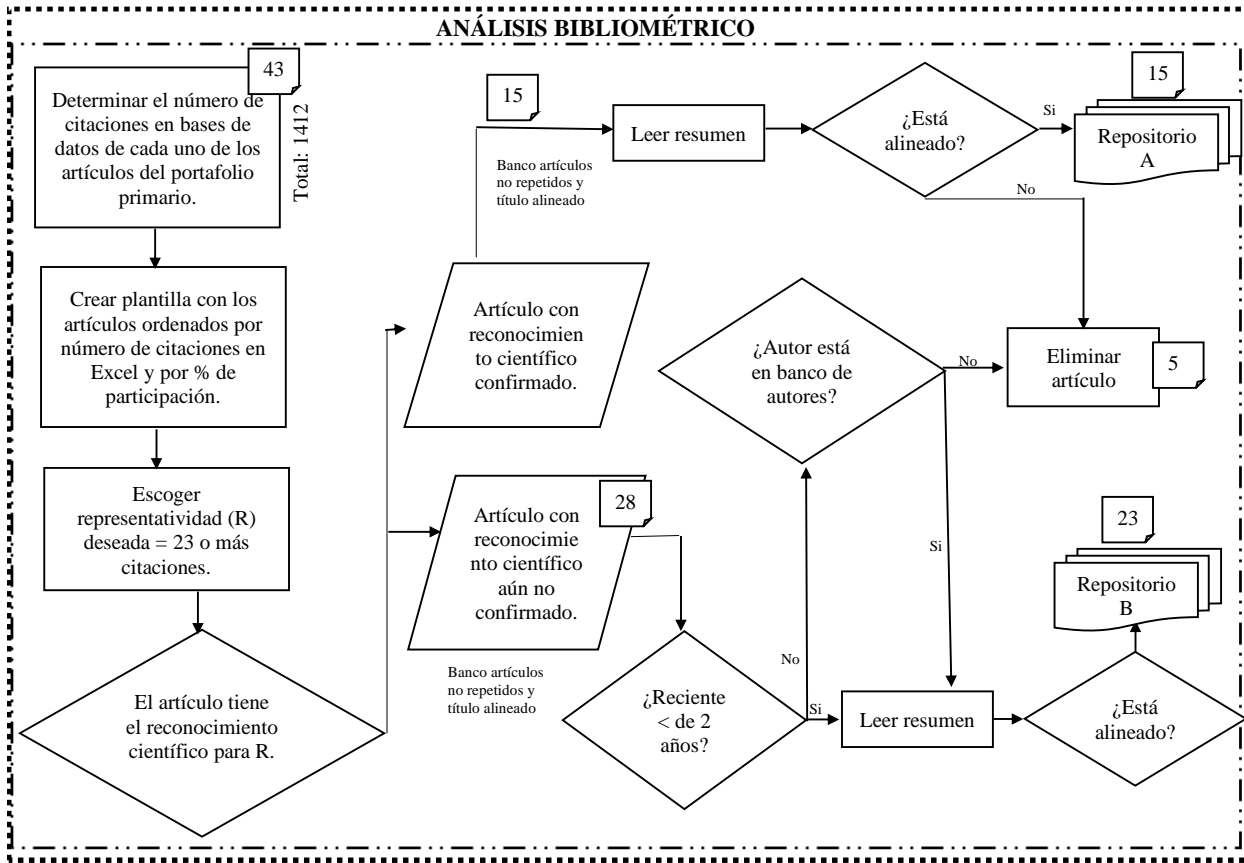


Figura 3. Diagrama de flujo de selección portafolio bibliométrico para su análisis.

Tabla 4. Artículos del portafolio bibliográfico final.

| Año | Autores | Nombre del artículo | # citas Scopus/ WoS |
|------|---|--|---------------------|
| 2016 | Agnieszka Cydzik-Kwiatkowska ¹ , Magdalena Zielin´ska | Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems | 235 |
| 2020 | Jianlong Wang, LibingChu, László Wojnárovits, Erzsébet Takács | Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview | 228 |
| 2018 | Gaur, Nisha, Narasimhulu, Korrapati, Narasimhulu, Korrapati | Recent advances in the bio-remediation of persistent organic pollutants and its effect on environment | 160 |
| 2019 | Jie Hou, Zeyou Chen, Ju Gao, Yonglei Xie, Linyun Lia, Songyan Qinc, Qing Wanga, Daqing Maob, Yi Luo | Simultaneous removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from pharmaceutical wastewater using the combinations of up-flow anaerobic sludge bed, anoxic-oxic tank, and advanced oxidation technologies | 106 |
| 2015 | Xin Lu, Xu-Xiang Zhang, Zhu Wang, Kailong Huang, Yuan Wang, Weigang Liang, Yunfei Tan, BoLiu, Junying Tang | Bacterial Pathogens and Community Composition in Advanced Sewage Treatment Systems Revealed by Metagenomics Analysis Based on High-Throughput Sequencing | 72 |
| 2019 | Jorge Rodríguez-Chueca, Saulo Varella della Giustinac, Jaqueline Rocha, Telma Fernandes, Cristina Pablos, Ángel Encinas, Damià Barceló, Sara Rodríguez-Mozaz, Célia M. Manaia, Javier Marugán | Assessment of full-scale tertiary wastewater treatment by UV-C based-AOPs: Removal or persistence of antibiotics and antibiotic resistance genes? | 69 |
| 2019 | J. Rodríguez-Chueca, C. García-Cañibano, R.-J. Lepistö, Á. Encinad, J. Pellinen, J. Marugán | Intensification of UV-C tertiary treatment: Disinfection and removal of micropollutants by sulfate radical based Advanced Oxidation Processes | 63 |
| 2020 | Jianlong Wang, Xiaoying Chen | Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview | 45 |

| | | | |
|------|---|--|----|
| 2017 | Erik R. Coatsa, Cynthia K. Brinkmana, Stephen Lee | Characterizing and contrasting the microbial ecology of laboratory and full-scale EBPR systems cultured on synthetic and real wastewaters | 43 |
| 2013 | A.-C. Chevremont,a,b, J.-L. Boudennea, B. Coulomba, A.-M. Farnet | Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-chemical parameters of soil | 38 |
| 2017 | Feifei Wang, Doris van Halem, Gang Liu, Karin Lekkerkerker-Teunissen, Jan Peter van der Hoek | Effect of residual H ₂ O ₂ from advanced oxidation processes on subsequent biological water treatment: A laboratory batch study | 32 |
| 2021 | YunusAhmed, JiexiZhong, ZhiguoYuan, JianhuaGuo | Simultaneous removal of antibiotic resistant bacteria, antibiotic resistance genes, and micropollutants by a modified photo-Fenton process | 30 |
| 2021 | Chi Zhang, YiLi, Hongchen Shen, Danmeng Sh | Simultaneous coupling of photocatalytic and biological processes: A promising synergistic alternative for enhancing decontamination of recalcitrant compounds in water | 27 |
| 2021 | Libing Chu, Jianlong Wang, Shijun He, Chuanhong Chen, L'aszl o Wojn'arovits, Erzs ebet Tak'acs | Treatment of pharmaceutical wastewater by ionizing radiation: Removal of antibiotics, antimicrobial resistance genes and antimicrobial activity | 25 |
| 2021 | ShihaiDeng, LakshmiJothinathan, QinqingCai, RuiLi, MengyuanWu, SayLeongOng, JiangyongHu | FeOx@GAC catalyzed microbubble ozonation coupled with biological process for industrial phenolic wastewater treatment: Catalytic performance, biological process screening and microbial characteristics | 23 |
| 2017 | Dong Li, Ben Stanford,*, Eric Dickenson, Wendell O. Khunjar, Carissa L. Homme, Erik J. Rosenfeldt, Jonathan O. Sharp | Effect of advanced oxidation on N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation and microbial ecology during pilot-scale biological activated carbon filtration | 22 |
| 2020 | Qian Zhao, Mei Li, Kefeng Zhang, Ning Wang, Kaikai Wang, Hongbo Wang, Shujuan Meng, Ruimin Mu | Effect of ultrasound irradiation combined with ozone pretreatment on the anaerobic digestion for the biosludge exposed to trace-level levofloxacin: Degradation, microbial community and ARGs analysis | 22 |
| 2021 | Shijie Yao, Jianfeng Y, Qing Yang, Yaru Hu, Tianyang Zhang, Lei Jiang, Salvator Munezero, Kuangfei Lin Changzheng Cui | Occurrence and removal of antibiotics, antibiotic resistance genes, and bacterial communities in hospital wastewater | 17 |

| | | | |
|------|--|--|----|
| 2021 | Diana Martínez-Pachón, Rodrigo A. Echeverry-Gallego, Efraím A. Serna-Galvis, José Miguel Villarreal, Ana María Botero-Coy, Félix Hernández, Ricardo A. Torres-Palma, Alejandro Moncayo-Lasso | Treatment of wastewater effluents from Bogotá – Colombia by the photo-electro-Fenton process: Elimination of bacteria and pharmaceutical | 16 |
| 2020 | Lei Chen, Zhi Zhou, Chaofeng Shen and Yilu Xu | Inactivation of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes by electrochemical oxidation/electro-Fenton process | 16 |
| 2020 | Zhirui Qin, Zhenhua Zhao, Wentao Jiao, Ziyu Han, Liling Xia, Yinqing Fang, Shiyu Wang, Longjie Ji, Ying Jiang | Coupled photocatalytic-bacterial degradation of pyrene: Removal enhancement and bacterial community responses | 12 |
| 2020 | Juntao Xia, Haohao Sun, Xueyan Ma, Kailong Huang, Lin Ye | Ozone pretreatment of wastewater containing aromatics reduces antibiotic resistance genes in bioreactors: The example of p-aminophenol | 11 |
| 2021 | ván F. Macías-Quiroga y Paula A. Henao-Aguirre y Alexander Marín-Flórez y Sandra M. Arredondo-López y Nancy R. Sanabria-González | Bibliometric analysis of advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment: global and Ibero-American research trends | 11 |
| 2021 | Pâmela B. Vilela, Alessandra S. Martins, Maria Clara V.M. Starling, Felipe A.R. de Souza, Giovana F.F. Pires, Ananda P. Aguilarb, Maria Eduarda A. Pintob, Tiago A.O. Mendesb, Camila C. de Amorim | Solar photon-Fenton process eliminates free plasmid DNA harboring antimicrobial resistance genes from wastewater | 8 |
| 2022 | Xiaoqing Meng, Fangjuan Li, Li Yia, Mahlatsi Yorgan Dieketsenga, Xiaomeng Wanga, Lixiang Zhoua, Guanyu Zheng | Free radicals removing extracellular polymeric substances to enhance the degradation of intracellular antibiotic resistance genes in multi-resistant <i>Pseudomonas Putida</i> by UV/H ₂ O ₂ and UV/peroxydisulfate disinfection processes | 5 |
| 2021 | Pâmela B. Vilela, Rondon P. Mendonça Neto, Maria Clara V.M. Starling, Alessandra S. Martins, Giovanna F.F. Pires, Felipe A.R. Souza, Camila C. Amorim | Metagenomic analysis of MWWTP effluent treated via solar photo-Fenton at neutral pH: Effects upon microbial community, priority pathogens, and antibiotic resistance genes | 4 |
| 2022 | Wiktor Zieliński, Jakub Hubeny, Martyna Buta-Hubeny, Damian Rolbiecki, Monika Harnisz, Łukasz Paukszto, Ewa Korzeniewska | Metagenomics analysis of probable transmission of determinants of antibiotic resistance from wastewater to the environment – A case study | 4 |
| 2021 | Sydney L. Vinge, James S. Rosenblum, Yarrow S. Linden, Adrian Saenz, Natalie M. Hull, and Karl G. Linden | Assessment of UV Disinfection and Advanced Oxidation Processes for Treatment and Reuse of Hydraulic Fracturing Produced Water | 3 |

| | | | |
|------|---|---|---|
| 2019 | Luciano de Oliveira Gonçalves, Maria Clara V. M. Starling, Cintia Dutra Leal, Daniel V. M. Oliveira, Juliana Calábria Araújo, Mônica Maria D. Leão Camila C. Amorim | Enhanced biodiesel industry wastewater treatment via a hybrid MBBR combined with advanced oxidation processes: analysis of active microbiota and toxicity removal | 3 |
| 2022 | Takashi Azuma, Masaru Usui and Tetsuya Hayash | Inactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria in Wastewater by Ozone-Based Advanced Water Treatment Processes | 2 |
| 2022 | Pamela B. Vilela, Maria Clara V.M. Starling, Rondon P. Mendonça Neto, Felipe A.R. de Souza, Giovanna F.F. Piresa, Camila C. Amorim | Solar photo-Fenton mediated by alternative oxidants for MWWTP effluent quality improvement: Impact on microbial community, priority pathogens and removal of antibiotic-resistant genes | 1 |
| 2021 | Marcela França Dias · Deborah Leroy-Freitas · Elayne Cristina Machado · Leticia da Silva Santos · Cintia Dutra Leal · Gabriel da Rocha Fernandes · Juliana Calábria de Araújo | Effects of activated sludge and UV disinfection processes on the bacterial community and antibiotic resistance profile in a municipal wastewater treatment plant | 1 |
| 2020 | Weidong Chen, Jie Weia, Zhiguo Sua,d, Linwei Wub, Min Liuc, Xiaoxuan Huangd, Pengcheng Yaoe, Donghui Wen | Deterministic mechanisms drive bacterial communities assembly in industrial wastewater treatment system | 0 |
| 2021 | Xuening Fei, Songya Li., Linpei Wang, Le Wang and Fuqiang Chen | Impact of light on anoxic/oxic reactors: performance, quorum sensing, and metagenomic characteristics | 0 |
| 2022 | Gulnara Maniakova, María Inmaculada Polo-López, Isabel Oller, María Jesús Abeledo-Lameiro, Sixto Malato, Luigi Rizzo | Simultaneous disinfection and microcontaminants elimination of urban wastewater secondary effluent by solar advanced oxidation sequential treatment at pilot scale | 0 |
| 2022 | Guangqiang Caia, Tongzhou Liua, Jinsong Zhanga, Haoran Song, Qijun Jiang, Chang Zhou | Control for chlorine resistant spore forming bacteria by the coupling of pre-oxidation and coagulation sedimentation, and UV-AOPs enhanced inactivation in drinking water treatment | 0 |
| 2022 | F. Piras, G. Nakhlab, S. Murgoloc, C. De Cegliec, G. Mascoloc, K. Belld, T. Jeannee, G. Melea, D. Santoro | Optimal integration of vacuum UV with granular biofiltration for advanced wastewater treatment: Impact of process sequence on CECs removal and microbial ecology | 0 |
| 2022 | Qingyun Zhai· Lili Song· Xiyan Ji· Yueshu Yu· Jing Ye2 · Wenwu Xu · Meifang Hou | Research progress of advanced oxidation technology for the removal of Microcystis aeruginosa: a review | 0 |

Nota: Artículos ordenados por número de citas, de mayor a menor.

Teniendo en cuenta la lectura de los artículos del portafolio secundario y las preguntas planteadas, se analizan y responden cada una de ellas:

10.2.1 ¿Cuál es el número de investigaciones en el mundo durante los últimos 18 años que involucran la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas?

A partir del portafolio final y de acuerdo con la cantidad de artículos enfocados en la detección de microorganismos (comunidades microbianas) a partir del 16S y de genes de resistencia (usando como método la metagenómica) para evaluar la efectividad de tratamientos con AOP, se muestra que hay un notable crecimiento en el número de publicaciones (Figura 4), siendo el periodo del 2016 al 2022 el más productivo, representando el 94,7% del total de publicaciones globales. Si este valor se compara con el portafolio primario, donde en este periodo de tiempo representa el 95,3%, se muestra que hay un lento crecimiento e incursión de la metagenómica como método analítico relacionado con los AOP en tratamiento de aguas; por lo que este relativo, reciente y creciente interés, se debe a una mayor preocupación por el efecto de los contaminantes emergentes, sobre todo por:

- Los antibióticos “que están acelerando el desarrollo y propagación de la resistencia a los antibacterianos en el medio ambiente, lo que resulta en un mayor riesgo para el control y prevención de enfermedades humanas” (Hou et al., 2019).
- Los ineficientes métodos de tratamiento de aguas convencionales, que “no fueron diseñados específicamente para la eliminación de estos contaminantes emergentes y tienen una baja eficiencia de eliminación de antibióticos, genes resistentes a los antibióticos (ARG) y bacterias resistentes a antibióticos (ARB)” (Hou et al., 2019).

Este aumento en el número de artículos en tan poco tiempo, se sustenta en las grandes dificultades para determinar bacterias en cultivos (ya que no todas son cultivables) y la específica

detección de patógenos de las recientes tecnologías moleculares como “la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), la PCR cuantitativa en tiempo real (q-PCR), los microarreglos, que han sido ampliamente usados para detectar patógenos en aguas residuales y naturales” (Lu et al., 2015), dificultando generar un panorama amplio de la comunidad microbiana del medio, pero que gracias a la secuencia de alto rendimiento, se puede ahondar en estas complejas comunidades microbianas usando pirosecuenciación y el gen RNAr 16S para determinar las abundancias de las poblaciones microbianas y de genes de interés como los de los ARG, los cuales pueden dar información relevante sobre la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas, como lo son los AOP, enfocados en la eliminación de este tipo de contaminantes emergentes.



Figura 4. Número de publicaciones globales 2004-2022 portafolio final

Se proyecta de acuerdo al número de artículos en este rango de tiempo (2004-2022) que para dentro de los próximos 10 años el número de publicaciones referentes al tema crecerá, pero

de manera lenta, alcanzando para el 2032 un número de 11 artículos, lo cual indica, que a pesar de ser un tema nuevo, si se mantiene el ritmo de investigaciones de los últimos 18 años su crecimiento será relativamente lento, sin embargo, si se tiene en cuenta el aumento en la contaminación del recurso hídrico, la escasez de este y los avances en el tratamiento de aguas (con AOP) junto con la metagenómica, el interés en este tipo de investigaciones podría llegar a ser aún mayor de lo estimado.

10.2.2 ¿Cómo se distribuyen las investigaciones por continentes y países?

El número de artículos publicados referentes a este tema se encuentran principalmente relacionados con investigaciones de países como: China, España, Estados Unidos y Brasil (Figura 5); estos dos primeros pueden explicar tal crecimiento en investigaciones referentes al tratamiento de aguas con AOP y eliminación de microorganismos (especialmente bacterias y bacterias resistentes a antibióticos), ya que como lo menciona Lu et al., (2015), en China, las plantas de tratamiento de aguas residuales normalmente consisten en sedimentación primaria y tratamiento biológico secundario, pero a pesar de la alta eliminación de patógenos, estos efluentes con patógenos residuales merecen la preocupación pública; así mismo, el aumento en la demanda de riego para la agricultura e infraestructura obsoleta generan altos niveles de contaminación al ser estas aguas liberadas en cuerpos de aguas superficiales que es del 80 al 90% en Asia y el Pacífico (Author Corporate: UNESCO World Water Assessment Programme, 2019). Lo mismo pasa con España, que presenta necesidades de resolver problemas de purificación de aguas porque es un país que enfrenta escases de agua al igual que China (Macías-Quiroga et al., 2021). Por su parte, el que también haya un número creciente de investigaciones enfocadas hacia los AOP y de la eliminación de ARB y ARG en Brasil y Estados Unidos. Con respecto a Brasil se menciona que

“está entre los cinco países con mayor participación en el consumo de antimicrobianos en la producción de alimentos, detrás de China y EE. UU” (Dias et al., 2022), por lo que varios de los artículos representativos de Brasil, (tal como ocurre en China y Estados Unidos) muestran la aplicación de AOP como proceso final de tratamiento de aguas, después de haber sido tratadas previamente por procesos biológicos (secundarios) como biorreactores.

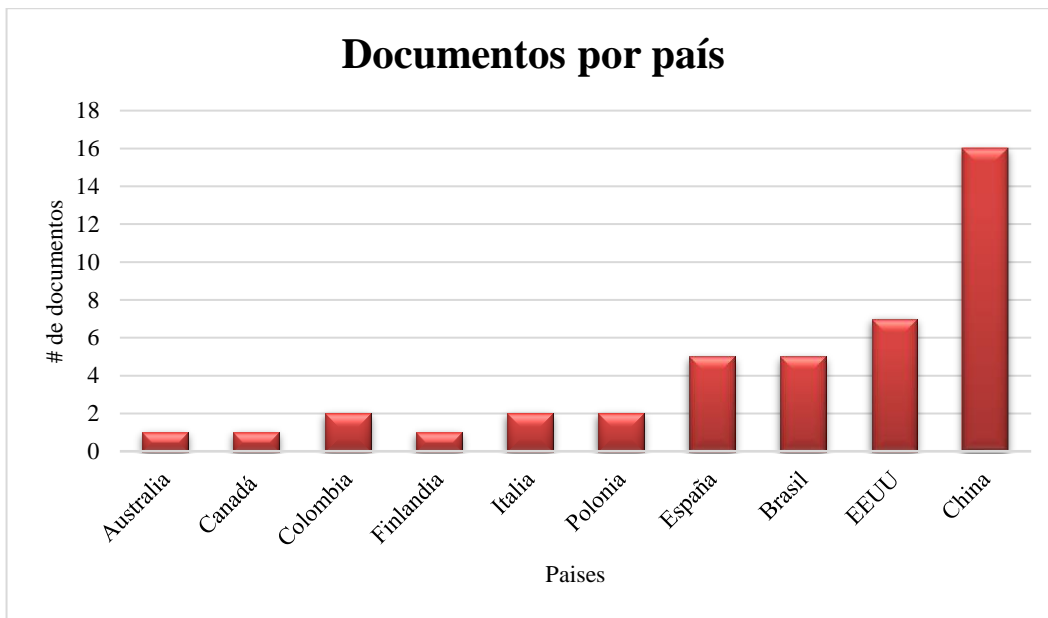


Figura 5. *Número de publicaciones globales*

Otro enfoque para explicar estas tendencias de investigación en estos países, se hace a partir del informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los recursos hídricos en el mundo para el 2019 (Author Corporate: UNESCO World Water Assessment Programme, 2019), el cual menciona que países como China aporta menos del 50% en recursos financieros para el saneamiento, por lo que la brecha de infraestructura y calidad del agua en este país es deficiente, pero destina un buen porcentaje en investigación y desarrollo en comparación con un país como Brasil que aporta entre el 50 y el 75% de lo que es necesario para zonas urbanas y rurales y que

destina menos recursos en investigación y desarrollo, lo cual es consistente con las tendencias de investigación que se observan en la Figura 5. Países con menos inversión en infraestructura y recursos financieros a este tema, como China, demuestra la necesidad de estudiar y solucionar dicha problemática. En cuanto a países Europeos no se presentan reportes del nivel de inversión en calidad del agua y para el caso de Estados Unidos el porcentaje de inversión en investigación y desarrollo para el 2020 corresponde al de 3.45% de su producto interno bruto (PIB) según los indicadores del Banco Mundial (*Gasto En Investigación y Desarrollo (% Del PIB) - United States / Data*, n.d.), lo que se podría ver reflejado en el número de publicaciones de este país en comparación con el resto de países del mundo. En América Latina, Brasil puntea en inversión en ciencia y desarrollo con un 1.21% de su PIB (según datos del Banco Mundial).

Los países como Australia, Canadá, Colombia, Finlandia, Italia y Polonia tienen una participación en conjunto del 21,4% en investigaciones sobre AOP y metagenómica en el tratamiento de aguas, mientras que España, Brasil, Estados Unidos y China aportan el 78,6%.

Canadá, aunque presenta una buena inversión de su PIB de gasto en investigación y desarrollo (1,7%) en comparación con países no desarrollados, desde hace 10 años viene presentando un declive, que hasta hace dos años ha empezado a recuperarse según los datos del Banco Mundial (*Gasto En Investigación y Desarrollo (% Del PIB) - Canada | Data*, n.d.); debido a esto, el país creó un fondo de innovación estratégica para fomentar la realización de proyectos de gran impacto en la industria, que según reportes de la UNESCO sobre ciencia en el mundo, han centrado tal financiación en áreas de desarrollo como: economía oceánica, fabricaciones del futuro, tecnología digital, industrias proteínicas e inteligencia artificial (UNESCO, 2021); es en ese sentido que aunque Canadá tiene un impacto significativo en el desarrollo científico a nivel mundial, producto de estos 10 años de decrecimiento evidencian poca incursión en investigación

por los AOP relacionados con la metagenómica; al mismo tiempo que el tipo de investigaciones se han dirigido en los últimos años en temas de informática y en menor medida hacia el saneamiento ambiental, aunque no es nulo, puesto que, parte de sus objetivos para enfrentar el cambio climático está la protección de los océanos enfocándose en las ciencias ambientales para resolver tales problemáticas. En cuanto al desarrollo de tecnologías de bioinformática, se refleja en ese mismo documento, el bajo número de investigaciones desde hace 10 años y que continúa en esa misma perspectiva.

Es importante destacar que Italia se encuentra entre los países que han abordado la temática, puesto que de toda Europa es el que mayor problemática tiene en cuanto a tratamiento de sus aguas, porque a pesar de que tiene un suministro de agua relativamente medio (superior al promedio europeo) y de que es uno de los de mayor extracción hídrica por habitante de Europa (más de 2000 litros/días, sobre todo destinada a actividades agrícolas), de las 494 masas de agua superficiales potables 113 requieren tratamiento avanzado y 35 presentan parámetros superiores a los límites permitidos (Lugaresi, 2008); esto indica el nivel de importancia de investigación en tratamientos avanzados para responder a dicha problemática.

Por su parte, Colombia al ser un país tercermundista, donde su gasto en investigación y desarrollo del PIB es de tan solo el 0,29%, es importante resaltar el interés que lo posiciona en el mapa de países que han incursionado en el estudio de la temática, permitiendo el crecimiento en este tipo de publicaciones.

10.2.3 ¿Cuáles son los artículos con mayor reconocimiento científico?

En cuanto al reconocimiento científico de los artículos del portafolio final (Figura 6), se muestra que hay un crecimiento de citas entre los años 2016 al 2019 y que va disminuyendo desde

el 2020. Lo anterior refleja un comportamiento común ya que “las citas requieren tiempo para recopilarse, particularmente las más recientes” (León-Vargas et al., 2022) con respecto al tiempo de investigación del presente trabajo. Dentro de las citas anuales, el año con mayor número de citas es el 2020 con 390 citas (22.53% del total), destacándose Wang et al., (2020), donde aborda en su estudio una revisión sobre la aparición y el destino de los antibióticos y genes de resistencia presentes en las aguas residuales, explicando cómo nuevas tecnologías de descontaminación como los AOP pueden ser muy útiles y ser enfocados en la degradación de los antibióticos y de los genes de resistencia a antibióticos. Adicionalmente, el artículo con el mayor número de citas de todo el portafolio es el de Cydzik-Kwiatkowska & Zielińska, (2016) (Tabla 5), el cual aborda la importancia de las tecnologías de secuenciación de última generación para conocer la diversidad microbiana, comprender su ecología e interacciones intra-especies y así poder mejorar los procesos de descontaminación de aguas usando lodos activados y adicionalmente AOP.

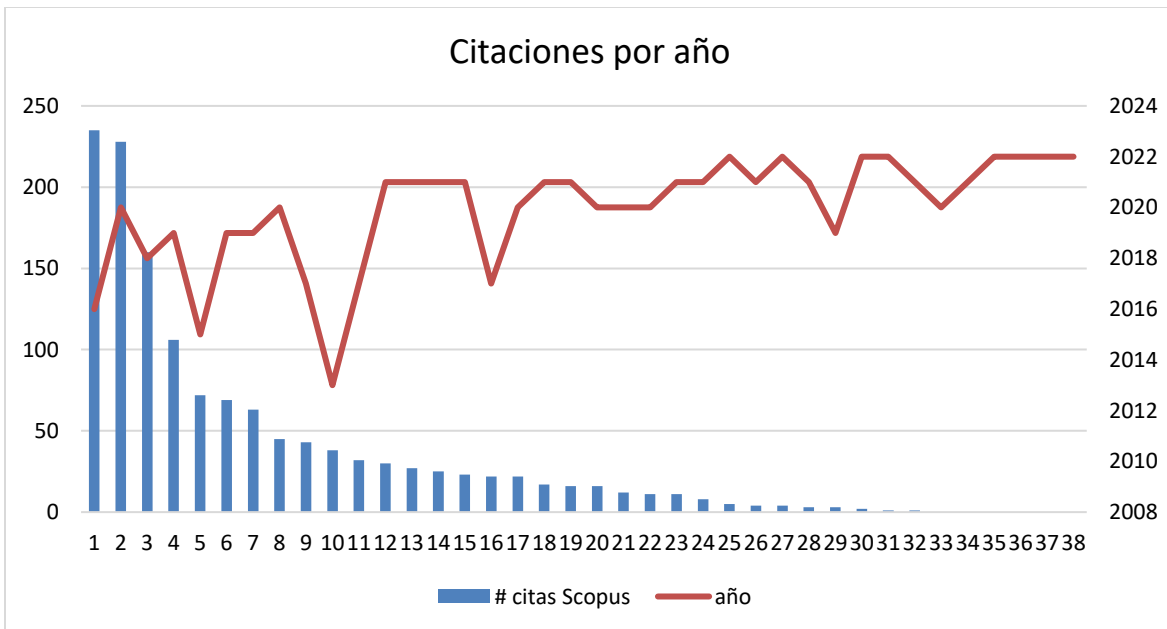


Figura 6. Artículos con mayor reconocimiento entre los artículos del portafolio bibliográfico

Tabla 5. Top de los 10 artículos con mayor reconocimiento

| # | Año | Autores | Nombre del artículo | # de citas |
|---|------|---|---|------------|
| 1 | 2016 | Agnieszka Cydzik-Kwiatkowska, Magdalena Zielińska | Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems. | 235 |
| 2 | 2020 | Jianlong Wang, Libing Chu, László Wojnárovits, Erzsébet Takács | Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview. | 228 |
| 3 | 2018 | Gaur, Nisha, Narasimhulu, Korrapati, Narasimhulu, Korrapati | Recent advances in the bioremediation of persistent organic pollutants and its effect on environment. | 160 |
| 4 | 2019 | Jie Hou, Zeyou Chen, Ju Gao, Yonglei Xiec, Linyun Lia, Songyan Qinc, Qing Wanga, Daqing Maob, Yi Luo | Simultaneous removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from pharmaceutical wastewater using the combinations of up-flow anaerobic sludge bed, anoxic-oxic tank, and advanced oxidation technologies. | 106 |
| 5 | 2015 | Xin Lu, Xu-Xiang Zhang, Zhu Wang, Kailong Huang, Yuan Wang, Weigang Liang, Yunfei Tan, Bo Liu, Junying Tang | Bacterial Pathogens and Community Composition in Advanced Sewage Treatment Systems Revealed by Metagenomics Analysis Based on High-Throughput Sequencing. | 72 |
| 6 | 2019 | Jorge Rodríguez-Chueca, Saulo Varella della Giustinac, Jaqueline Rocha, Telma Fernandes, Cristina Pablos, Ángel Encinas, Damià Barceló, Sara Rodríguez-Mozaz, Célia M. Manaia, Javier Marugán | Assessment of full-scale tertiary wastewater treatment by UV-C based-AOPs: Removal or persistence of antibiotics and antibiotic resistance genes? | 69 |
| 7 | 2019 | J. Rodríguez-Chueca, C. García-Cañibano, R.-J. Lepistö, Á. Encinad, J. Pellinen, J. Marugán | Intensification of UV-C tertiary treatment: Disinfection and removal of micropollutants by sulfate radical based Advanced Oxidation Processes. | 63 |
| 8 | 2020 | Jianlong Wang, Xiaoying Chen | Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview. | 45 |

| | | | | |
|----|------|---|--|----|
| 9 | 2017 | Erik R. Coatsa, Cynthia K. Brinkmana, Stephen Lee | Characterizing and contrasting the microbial ecology of laboratory and full-scale EBPR systems cultured on synthetic and real wastewaters. | 43 |
| 10 | 2013 | A.-C. Chevremonta,b, J.-L. Boudennea, B. Coulomba, A.-M. Farnet | Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-chemical parameters of soil. | 38 |

10.2.4 *¿Cómo se estructura la red de cooperación entre autores? Y ¿Cómo se distribuyen los autores en las redes?*

La Figura 7 muestra los autores más representativos por número de colaboraciones en cada grupo (Cluster). Se clasificaron tres grupos relacionados, identificados con colores rojo, azul y verde, donde cada grupo representa una misma afiliación universitaria. El grupo rojo (Grupo de Aplicación Ambiental de Procesos Avanzados de Oxidación Universidad de Federal de Minas Gerais) presentó el mayor número de colaboraciones internas con 104 en total, seguida del grupo verde (Departamento de sanidad y medio ambiente Universidad de Federal de Minas Gerais) con 52 y el grupo azul (University Center-Catholic of SantaCatarina) con 18 colaboraciones internas. Del mismo modo se destacan dos autores del grupo rojo (Amorim, C y Starling, M) quienes han realizado colaboraciones externas con otras instituciones como la University Center-Catholic of Santa Catarina y Universidade Federal de Viçosa, también con entidades como el instituto René Rachou, Fundação Oswaldo Cruz, y con grupos de investigación diferentes al de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, como lo es el Departamento de Ingeniería Civil y al Grupo de Aplicación Ambiental de Procesos Avanzados de Oxidación, de la misma institución (Universidad de Federal de Minas Gerais). Igualmente, el grupo azul ha colaborado externamente con las mismas dos autoras (Amorim, C y Starling, M) del grupo rojo, y presenta igualmente colaboraciones con la Universidad Center-Catholic of Santa Catarina.

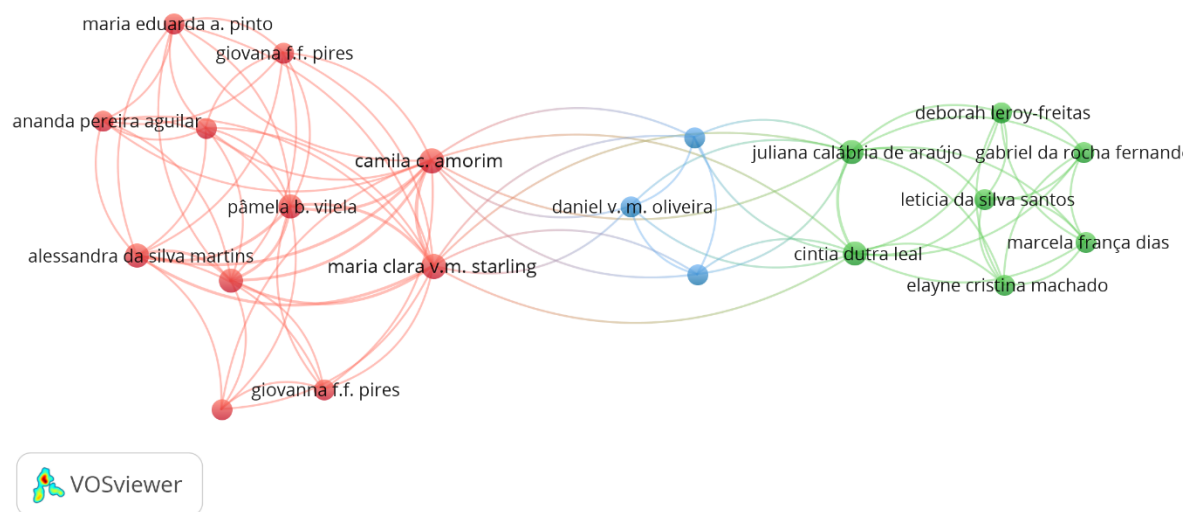


Figura 7. Red de coautorías

Ahora bien, las mayores colaboraciones internas que externas se dan en los grupos rojo (59,8%), seguida del grupo verde (29,9%), y por último el grupo azul (10.3%), lo que indica que el Grupo de Investigación de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad Federal de Minas Gerais es el que realiza un mayor aporte a la colaboración interna y externa al estudio de estas temáticas.

Por otro lado, se evidencia que del número total de autores de los 38 artículos del portafolio final (235 autores), tan solo 21 muestran colaboraciones externas. Estos 21 autores tienen una proximidad geográfica, cultural y lingüística que facilita una alta interacción entre ellos a pesar de que existan intereses de investigación comunes con otros autores un poco más alejados en estos aspectos.

Las coautorías en el tiempo también aumentan y guardan relación con la creciente publicación de documentos por año a nivel global. Como se ve en la Figura 8, tan solo 3 autores presentan coautorías visibles desde el 2019 y es a partir de ellos que surgen nuevas y más coautorías para los años 2020, 2021 y 2022. Por lo anterior, es de notar que el número de coautorías sobre el tema es relativamente bajo a nivel mundial, ya que al ser un tema que presenta pocas

publicaciones antes del 2016, no se tendrá el nivel alto de co-citaciones ni coautorías como se podría observar en otros temas con mayores tiempos de investigación.

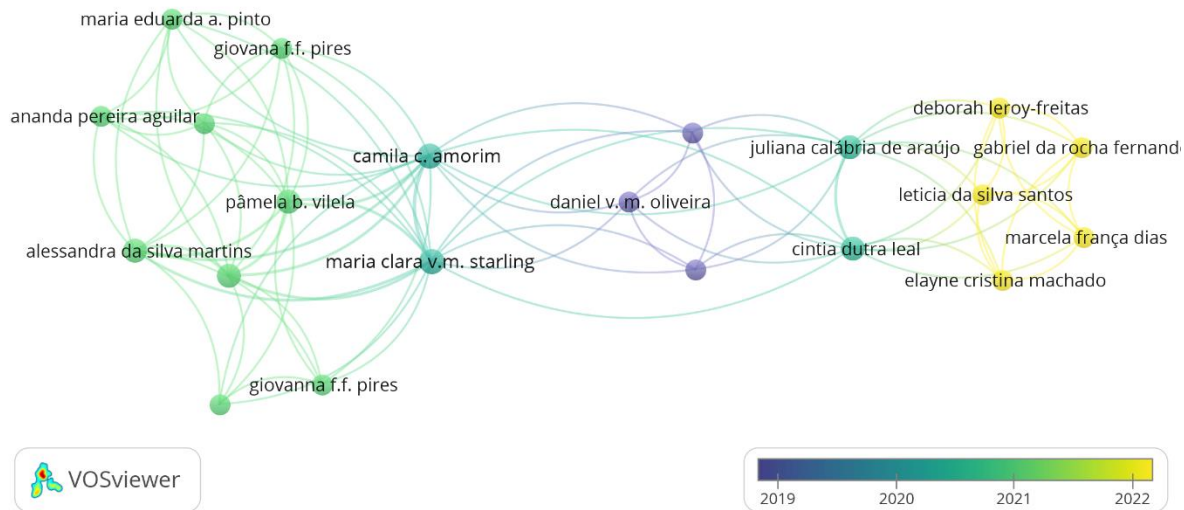


Figura 8. Red de coautorías en el tiempo

En la Figura 9, se evidencia la estructura de todas las relaciones entre autores de todos los 38 artículos del portafolio final, donde el grupo de color rojo que destaca en la imagen, corresponde al grupo de mayor coautorías (de 2 en adelante) tanto externas como internas, siendo Brasil por ende, el país donde mayor número de coautorías hay en contraste con los demás países, donde pese a que China y Estados Unidos tienen un mayor número de publicaciones referente al tema, sus nivel de colaboración aún son bajas, y en gran parte como se puede ver en la gráfica 10, se debe a su reciente publicación, e incursión del tema en las investigaciones.

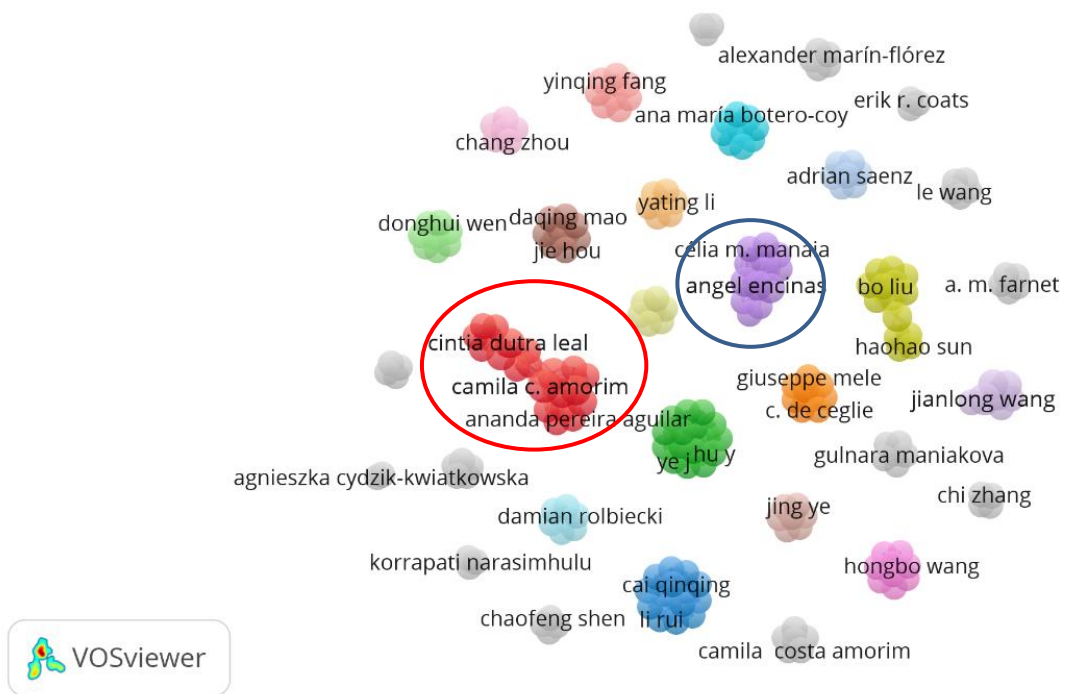


Figura 9. *Coautorías globales.*

Nota: El círculo rojo señalado en el mapa corresponde al grupo de mayor número de coautorías, que a su vez se registró en la Figura 7. Los otros grupos solo presentan coautorías internas y bajas, siendo de países como España (círculo azul), China y Estados Unidos. Los grupos de diferentes colores fuera de los dos círculos corresponden al resto de países, principalmente China. Cuanto más cercanos estén los autores entre sí, mayor será su relación en términos de autoría.

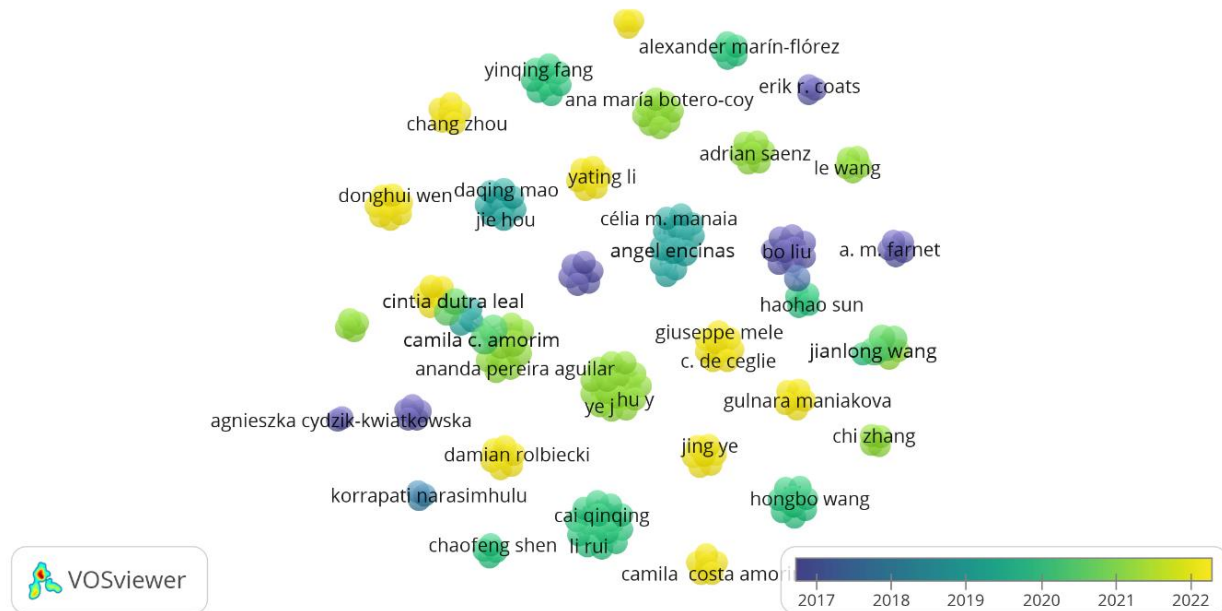


Figura 10. Coautorías globales por año

10.2.5 ¿Qué palabras clave se han usado con más frecuencia entre 2004-2022 en investigaciones que involucran la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas?

Las palabras clave más usadas entre el 2004 y 2022 que se evaluaron para el portafolio primario donde había 43 artículos alineados al tema, fueron en total 84 (tabla complementaria 3) y las que mayor representatividad tuvieron de acuerdo con el número de veces que fueron usadas son: *wastewater, treatment, bacterium, ARG, antibiotics, microorganisms, bacterial community, fenton, AOP, solar photofenton, genes, diversity, ARB, H₂O₂, municipal wastewater treatment, metagenomic analysis, qPCR, UV, AOP* (Figura 11); así muchos autores han estudiado prevalentemente la presencia y remoción de los ARG en aguas residuales usando principalmente el AOP basado en la reacción Fenton.

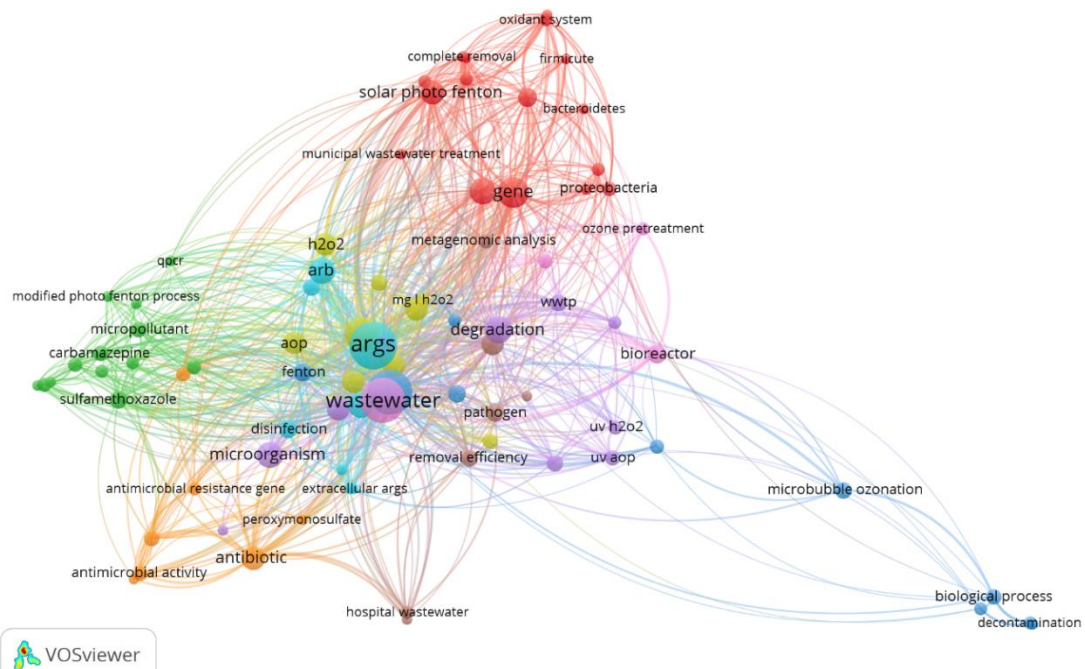


Figura 11. Red de co-currencias palabras clave del portafolio primario.

Así mismo, se evidencia en la red de palabras clave del portafolio primario (Figura 12) que los diferentes AOP generan conexiones nuevas en los últimos años con técnicas moleculares, elementos genéticos, estudios de comunidades microbiológicas y compuestos farmacéuticos.

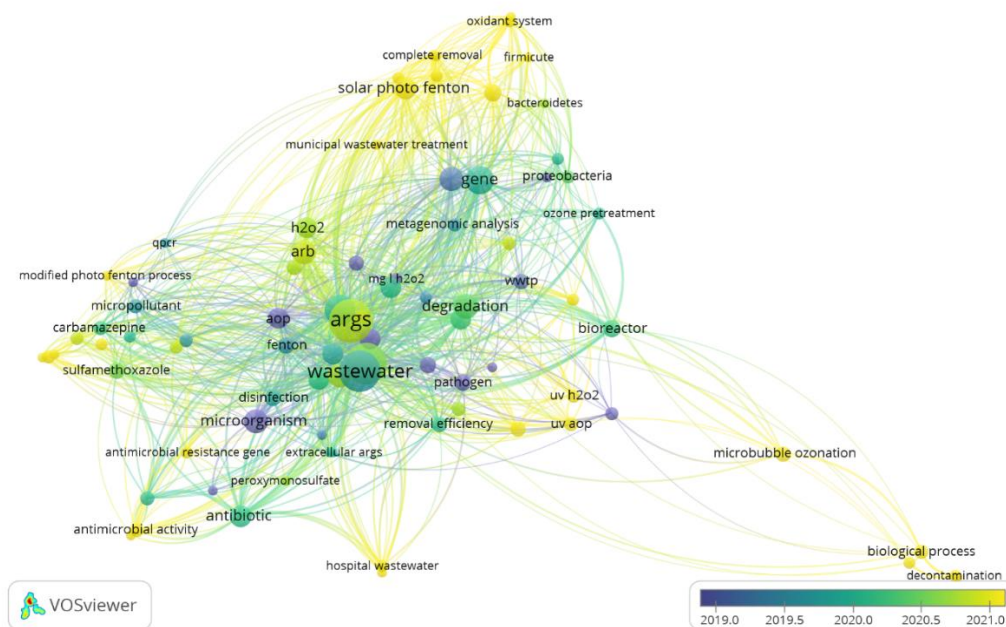


Figura 12. Red de co-currencias palabras clave del portafolio primario por años.

Terminada la etapa de adherencia, lectura de los resúmenes, y refinación del portafolio secundario, se obtuvo que las palabras más usadas fueron: *removal* (70), *wastewater* (59), *ARG* (59), *antibiotic* (26), *bacterium* (23), *water* (20), *antibiotic resistance gene* (19), *AOP* (18), *H₂O₂* (17) (Figura 13); lo cual difiere ligeramente con los resultados de la red del portafolio primario, ya que sigue prevaleciendo las co-ocurrencias del *estudio de los ARG*, *las aguas residuales*, *los antibióticos* y *los AOP*. Sin embargo, el número de veces que se usan las palabras *metagenómicas*, *qPCR*, *AOP*, *Fenton* disminuyen en comparación con los 43 artículos. Lo anterior puede demostrar que los intereses principales de investigación se dan en aguas residuales, las cuales son tratadas empleando AOPS (con prevalencia del uso de H₂O₂) para la eliminación de contaminantes como antibióticos, de genes de resistencia a antibióticos y de microorganismos resistentes a antibióticos.

Por otro lado, palabras clave que estén asociadas a la presencia de micro-contaminantes y compuestos farmacéuticos (principalmente antibióticos) y su eliminación por diferentes tratamientos también se consideraron. En la red de co-currencias obtenidas, palabras clave como *diclofenaco*, *tetraciclina*, *trimetoprima* aparecen tanto en el portafolio primario (Figura 11) como en el portafolio final; y palabras clave como *sulfametoxazol* aparecen adicionalmente en el portafolio final.

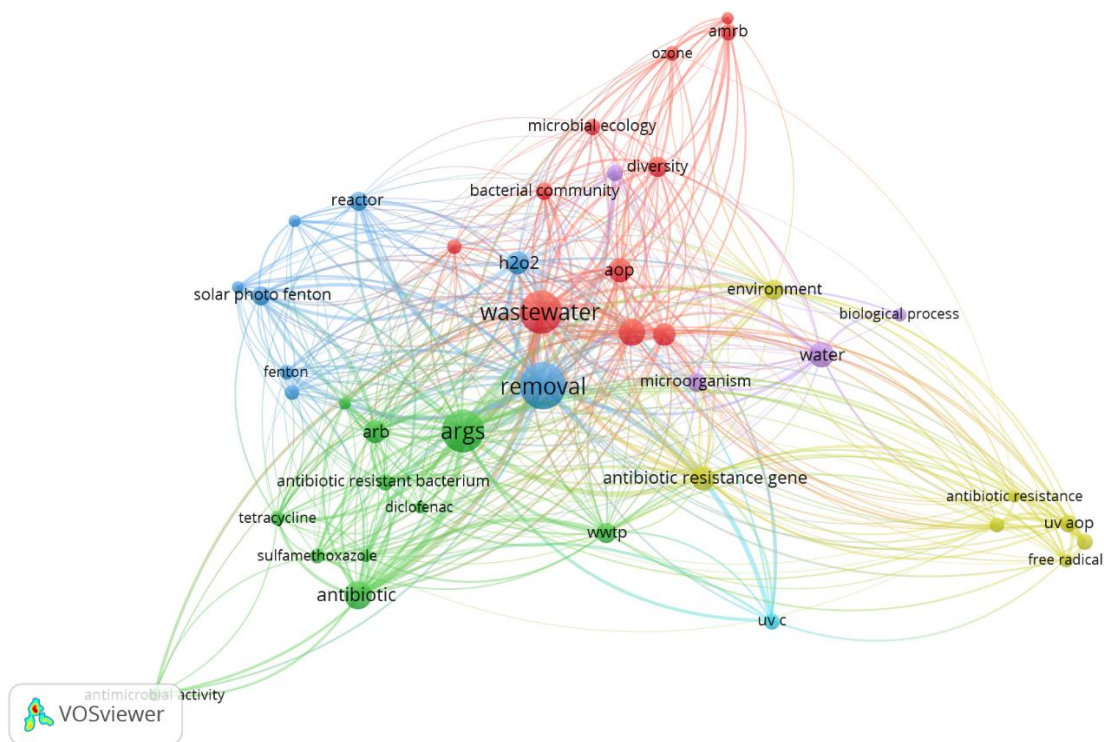


Figura 13. Red de coocurrencias del portafolio final

Por su parte, dentro de las palabras clave relacionadas exclusivamente con los AOP prevalecen algunas como: *AOP*, *ozono*, *photo Fenton*, *Fenton*, *Solar photo Fenton*, *H₂O₂*, *UV AOP*, *UV irradiation* y dentro de las palabras clave en relación con técnicas moleculares empleadas para el estudio de la diversidad o comunidades microbianas se tienen palabras clave como: *bacterial community*, *microbial community*, *microbial ecology*, *ARB*, *ARG*, *metagenomic analysis*, *PCR* y *qPCR*; estas dos últimas no presentes en el portafolio final.

En cuanto a la perspectiva temporal de las palabras clave del portafolio final (Figura 14), se observa una prevalencia en el último año, de trabajos asociados con palabras clave como *microorganismos resistentes a antibióticos*, *procesos de degradación con radicales libres* y *AOP*

con radiación UV; demostrándose un aumento de trabajos en estas temáticas entre el 2019 y el 2021.

Finalmente, se puede establecer que el proceso *Fenton* y *Photo-Fenton* son los AOP más estudiados para el tratamiento de aguas, especialmente aguas residuales, en donde se evalúan la degradación de micro-contaminantes químicos (predominantemente fármacos como el diclofenaco, trimetoprima y tetraciclina) y la eliminación de contaminantes biológicos como ARB y los ARG. A su vez, los métodos moleculares no son especificados, solo se obtienen aquellos enfocados en el estudio del ARNr16S, las comunidades microbianas, los ARB y los ARG a través del análisis metagenómico.

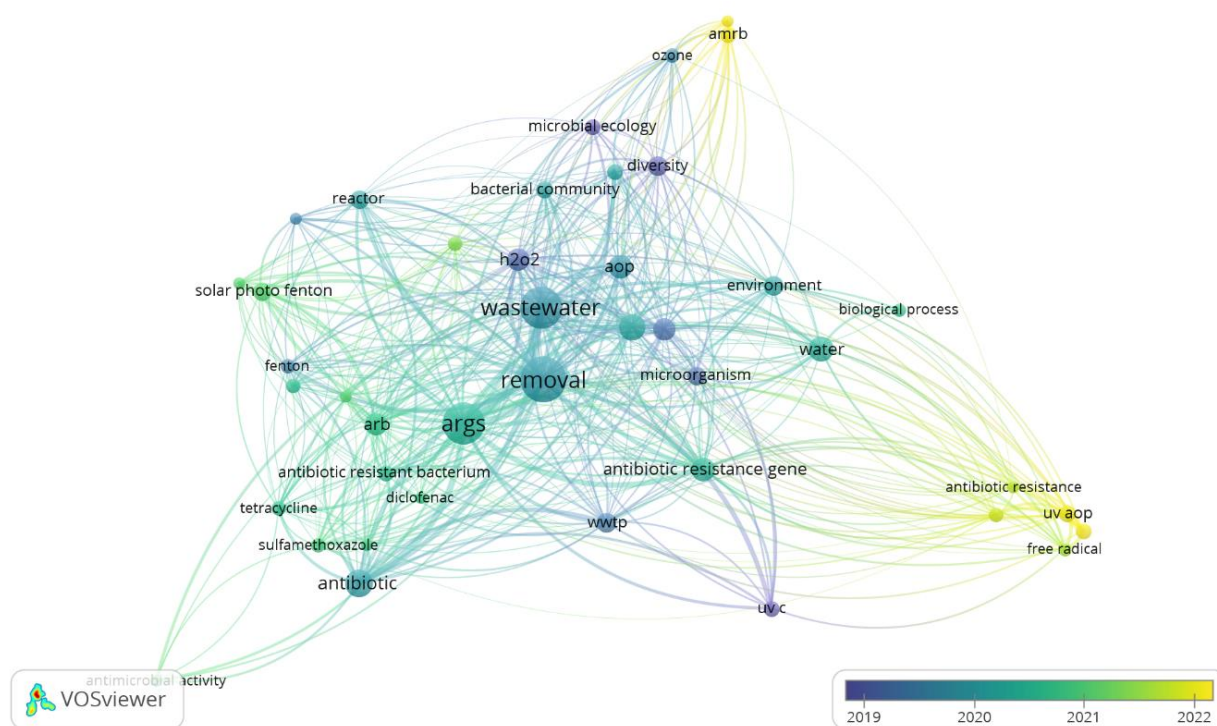
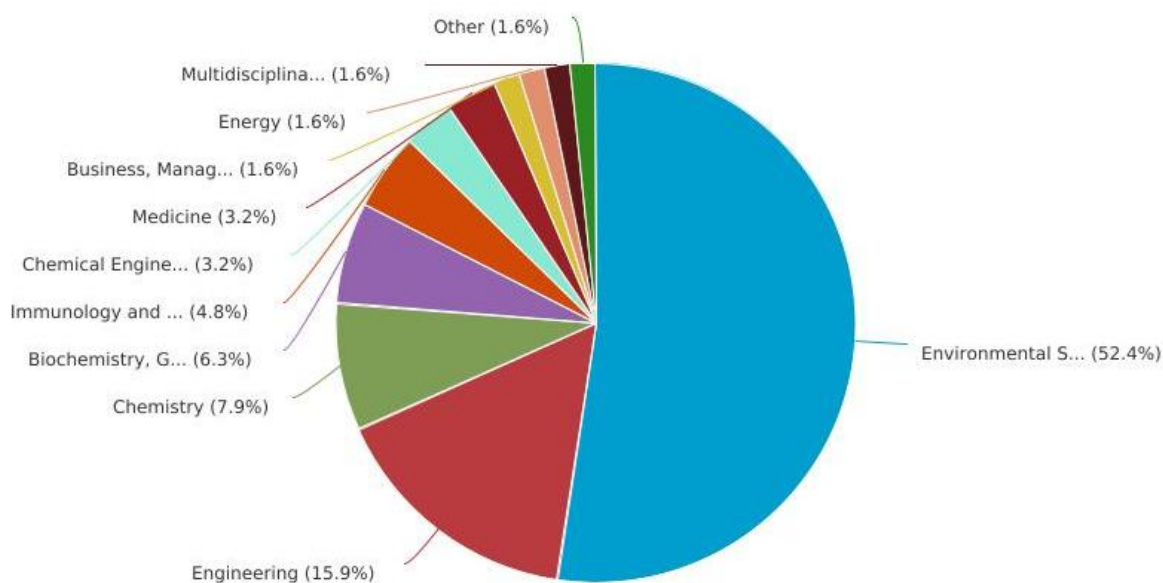


Figura 14. Red de coocurrencias del portafolio final por años.

10.2.6 ¿Cuáles fueron las áreas temáticas de interés en el tema de investigación?

Teniendo en cuenta que, a la hora de la búsqueda de cada una de las combinaciones, se usaron los filtros mencionados en la metodología en los que se encuentran unas categorías de tema, se evaluó en el portafolio final la cantidad de artículos asociados a estas categorías. Se encontró que 33 documentos están asociados a la categoría de *Ciencias Ambientales* (52,4%), seguida de 10 documentos en el área general de *Ingenierías* (15,9%), 5 documentos en *Química* (7,9%) y en Bioquímica y Genética molecular 4 documentos (6,3%) (ver Figura 15). Hay que tener en cuenta que varios artículos pueden estar presentes en varias categorías a la vez, por lo que estos datos no corresponden a que un solo artículo haya aportado a una sola temática.



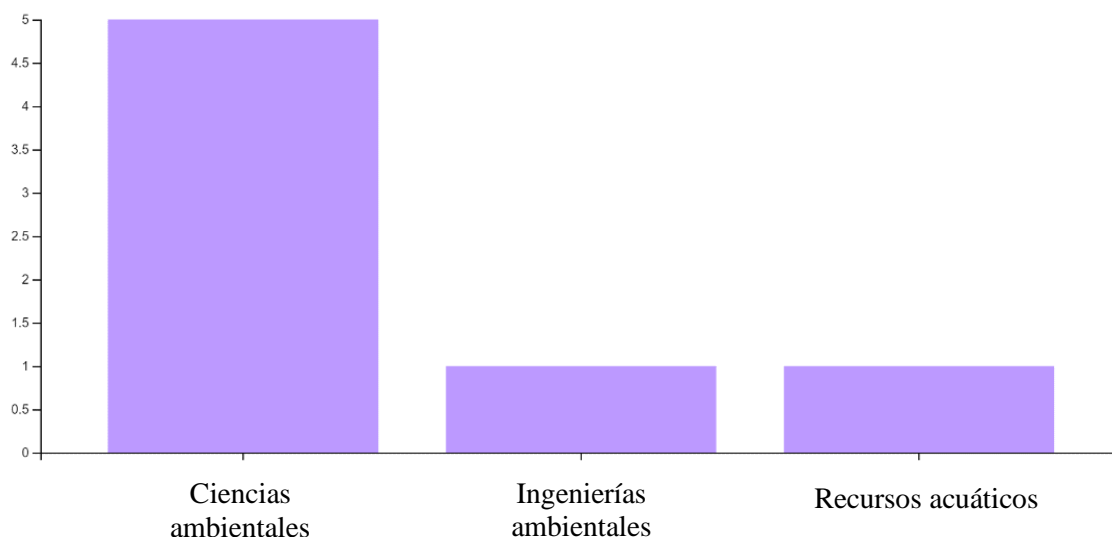


Figura 15. Áreas temáticas de interés en el tema de investigación asociadas a los documentos que hacen parte del portafolio final.

Nota: Tomado de Scopus y WoS.

Se puede establecer que las temáticas de mayor interés en estudios que involucren (AOP) con análisis metagenómicos, están las ciencias ambientales (esto claramente entendido desde la perspectiva del impacto al ambiente que tiene la contaminación específicamente el agua que es un recurso vital para los seres vivos y cómo perjudica a todos los niveles de la cadena trófica); seguido de las ingenierías (ya que hay un carácter importante en el diseño de la elaboración de los reactores o biorreactores), la química, la bioquímica y genética molecular (que otorga todo el componente analítico y teórico del estudio de las muestras de agua). De manera menos estudiada se encuentran en las temáticas de recursos acuáticos, ingeniería química, medicina, y ciencias agropecuarias.

Es importante mencionar que, las ciencias ambientales presentaron un mayor nivel de artículos relacionados, debido a que estas se encarga principalmente de discutir y proponer resoluciones de fenómenos naturales pero sobre todo hoy en día en desarrollar investigaciones enfocadas en problemáticas como la contaminación de todo tipo y mostrar un panorama más relacional de dichas problemáticas; para ello estas ciencias ambientales se apoyan en ciencias

básicas como la química y la biología molecular, las cuales les permiten sustentar de mejor manera los resultados obtenidos; así mismo, las ingenierías en general, aportan en el diseño y elaboración de los instrumentos (reactores) implicados en los estudios.

10.2.7 ¿Cuáles son los enfoques más destacados de estudio en las investigaciones?

Los enfoques más utilizados en las investigaciones se muestran en la tabla 6:

Tabla 6. Enfoques utilizados más destacados en las investigaciones del portafolio final.

| Artículo | Enfoque de la investigación |
|--|--|
| [1] Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems | <p>Se revisan resultados obtenidos en plantas de tratamientos de aguas residuales a gran escala para investigar las relaciones entre los microorganismos responsables en la eliminación de contaminantes de las aguas residuales. Se usaron técnicas moleculares como la secuenciación de alto rendimiento dirigida a regiones conservadas como el RNAr 16S, para conocer la composición de las muestras de los diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales.</p> <p>Mencionan como problema de análisis de los datos de las comunidades microbiana la falta de herramientas bioinformáticas que integren información de microorganismos presentes en aguas y lodos, sin embargo, aquí trabajan con MiDAS que es la base más cercana y completa que les permite tener información sobre la importancia funcional, morfología, diversidad y distribución. Dentro los géneros bacterianos identificados están: <i>Tetrasphaera</i>, <i>Trichococcus</i>, <i>Candidatus Microthrix</i>, <i>Rhodoferrax</i>, <i>Rhodobacter</i>, <i>Hyphomicrobium</i>, <i>Flavobacterium sp</i>, <i>Aquabacterium sp</i>. y <i>Thauera sp</i>. <i>Nitrospira sp</i>, <i>Candidatus Nitrotoga arctica</i>, con una abundancia de bacterias filamentosas. De los tratamientos de aguas evaluados, se observó que <i>Arcobacter butzleri</i>, <i>Aeromonas hydrophila</i> y <i>Klebsiella pneumoniae</i> presentes en aguas residuales fueron eliminadas eficientemente. Como parte sus conclusiones, establecen que la metagenómica permite conocer la diversidad microbiana y con ello los genes funcionales que pueden ser de utilidad para mejorar los procesos de tratamiento de aguas, usando con ello la bioaumentación dirigida, biodegradación y monitoreo de los procesos de tratamiento de aguas.</p> |
| [2] Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview | <p>El documento revisa la distribución y el destino de los antibióticos, ARG y ARB en plantas de tratamiento de aguas residuales a gran escala municipales de los años de 1999-2019, las plantas piloto no se tuvieron en cuenta. Dentro de los antibióticos más detectados está: macrólidos, sulfonamidas, trimetoprima, quinolonas y tetraciclinas. Los ARG más encontrados fueron: los genes bla (CTXM y TEM), sul (1 y 2) tet (O, Q, W) y ermB. Dentro de los artículos revisados, tomaron varias tecnologías de tratamiento como: sorción, AOP y biodegradación. Los AOP más desatacados para reducir el riesgo y con mejores resultados en la</p> |

| | |
|---|--|
| | <p>degradación de antibióticos esta: Fenton, Ozonización, radiación ionizante. Las técnicas moleculares más usadas para determinar los ARG y los ARB en aguas han sido: la qPCR usando copias de ARG, pero también con marcador de RNAr 16S. Se destaca en la investigación, que el nivel de estudios presenta una preocupación mayor por los antibióticos que por los ARG, ya que estos últimos han sido trabajados y detectados posteriormente a los antibióticos.</p> <p>En cuanto a la eliminación de los ARG se encontró que es baja en comparación con el RNAr16S en plantas de tratamiento convencional, pero esta aumenta con AOP como con UV y la ozonización, aunque no se eliminan por completo.</p> |
| <p>[3] Recent advances in the bioremediation of persistent organic pollutants and its effect on environment</p> | <p>Aunque esta investigación no se basa en evaluar los AOP sino la biodegradación y biorremediación, sí se analizan como procesos adicionales para terminar de destruir contaminantes orgánicos persistentes, microorganismos y material genético microbiano. La metagenómica tiene varios enfoques de uso, uno corresponde a la determinación de comunidades bacterianas para seleccionar aquellas que pueden ser de utilidad para generar consorcios bacterianos que terminarán de degradar compuestos; el segundo enfoque consiste en generar bibliotecas metagenómicas para genes implicados en degradación de compuestos aromáticos, y modificar las bacterias genéticamente para elaborar celdas de combustibles, Nanomateriales, biopelículas. El tercer enfoque tiene que ver con el conteo de microorganismos para evaluar qué y cuánto se ha degradado en los procesos. Para esto último, en los AOP se encontró que el más efectivo es la fotocatalisis TiO_2/UV para disminuir el recuento de bacterias, pero hay pocas aplicaciones industriales debido a que es una tecnología en desarrollo.</p> |
| <p>[4] Simultaneous removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from pharmaceutical wastewater using the combinations of up-flow anaerobic sludge bed, anoxic-oxic tank, and advanced oxidation technologies</p> | <p>El estudio evaluó la degradación y/o eliminación de antibióticos y ARG, a partir de la construcción de un reactor de tratamiento de aguas residuales farmacéuticas a escala de laboratorio. Aunado a este reactor se usó 4 tipos de AOP (UV, ozonización, Fenton y Fenton/UV). Trabajaron con 18 tipos de antibióticos y 10 ARG de aguas residuales reales. Usaron qPCR para determinar el porcentaje de eliminación de genes de ARG y RNAr16S. Aunque no se habla de un ensayo metagenómico, técnicas moleculares como la qPCR demuestran la importancia de hacer metagenómica para poder luego determinar por qPCR aquellos genes de interés en aguas. De los 4 AOP usados, el que mejor presentó rendimiento en la eliminación de ARG y RNAr16S fue el sistema Fenton/UV en un tiempo de 60 minutos y se eliminaron por encima del 90% para el RNAr16S y un 52.4% para los ARG.</p> |
| <p>[5] Bacterial Pathogens and Community Composition in Advanced Sewage Treatment Systems Revealed by Metagenomics Analysis Based on High-Throughput Sequencing</p> | <p>El artículo se enfoca en el uso de la metagenómica por Illumina y pirosecuenciación para investigar los patógenos bacterianos y su posible virulencia en una planta de tratamiento de aguas residuales aplicando tanto procesos convencionales como avanzados. A su vez usa qPCR para confirmaciones. Usaron el gen RNAr16S el cual se amplificó con un conjunto de cebadores dirigidos a las regiones hipervariables V3-V4. Para el análisis, lo hicieron en la base Silva y la herramienta BLASTN. De las muestras tomadas tanto efluente primario, lodo activado, efluente secundario, filtro de arena, final de resina magnética, se determinó que la eficiencia de la eliminación depende principalmente del tratamiento aeróbico, y que la resina como proceso de tratamiento avanzado muestra remociones más altas en la mayoría de los patógenos en comparación con los otros tratamientos.</p> |

| | |
|--|--|
| [6] Assessment of full-scale tertiary wastewater treatment by UV-C based-AOPs: Removal or persistence of antibiotics and antibiotic resistance genes? | Aplican AOP a gran escala para la eliminación de antibióticos, ARG en una planta de tratamiento de aguas en España. Para el análisis de los ARG hicieron qPCR de las muestras tomadas y también analizaron el gen RNAr16S para determinar la carga bacteriana. Como resultados obtuvieron una mayor efectividad de la fotólisis oxidante para eliminar antibióticos que ARG, y los ARG tuvieron mayor inactivación sin añadir oxidantes, es decir con solo UV-C se obtuvo un eficaz tratamiento para esos. |
| [7] Intensification of UV-C tertiary treatment: Disinfection and removal of micropollutants by sulfate radical based Advanced Oxidation Processes | El estudio se basó en mejorar los procesos terciarios en plantas de tratamiento de aguas residuales, añadiendo radicales sulfatos, persulfatos con activación fotolítica y foto-catalítica para Fe (II). Esto se evaluó a partir de su eficiencia para la inactivación de microorganismos como para la eliminación de microcontaminantes. La metodología para análisis bacterianos no se usó metagenómica sino microorganismos modelo, por lo que el enfoque pudo haber tomado un estudio metagenómico para que los resultados fueran acorde con la toma de muestras reales en la planta de tratamiento y ejecutar resultados más verificables. Los dos microorganismos modelo fueron: <i>E. coli</i> y <i>E. faecalis</i> . Como parte de sus resultados lograron la desinfección total de las aguas residuales con bajas dosis de oxidante y UV-C. |
| [8] Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview | Es una revisión sobre cómo los ARG pueden ser adecuadamente tratados para evitar la propagación de resistencia a antimicrobianos, en términos de eficiencia de los diferentes procesos de tratamientos de aguas, entre ellos los AOP. En el caso de la cloración no se considera como una buena opción ya que, a partir de diferentes autores, se ha llegado a resultados donde se eleva la cantidad de estos en bacterias oportunistas, determinando esto mediante técnicas metagenómicas como las de Jia et al., (2019) mencionada por los autores. |
| [9] Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-chemical parameters of soil | La investigación tuvo como objetivo conocer el impacto del riego con aguas residuales tratadas con UV-LED (UV-LED WW) en los parámetros del suelo. Para lo anterior tuvieron que identificar la diversidad microbiana del agua. Las muestras de agua se tomaron de una depuradora del sur de Francia, y fueron tratadas con UV-A, UV-C, UV-A/UV-C, obteniendo la mayor reducción bacteriana con las dos primeras en 30 minutos. El análisis bacteriano no se realizó por medios moleculares, sino por microplacas, sin embargo, es importante recalcar que, al ser un artículo del 2013, es una muestra del interés en el estudio de las comunidades microbianas asociadas a los AOP. |
| [10] Characterizing and contrasting the microbial ecology of laboratory and full-scale EBPR systems cultured on synthetic and real wastewaters | La investigación evaluó los impactos de las aguas residuales (sintéticas frente a reales) en la ecología microbiana en la eliminación biológica de fósforo. Usaron metagenómica de Illumina y qPCR, con marcadores como RNAr16S. Los resultados mostraron que la eliminación de fósforo se da mejor en comunidades bacterianas mejoradas que en aguas donde hay mayor diversidad de bacterias (consorcios microbianos mixtos). Esta investigación destaca el uso de la metagenómica en el mejoramiento de procesos de tratamientos de aguas como lo es para la eliminación de fósforo. |
| [11] Effect of residual H ₂ O ₂ from advanced oxidation processes on subsequent biological water treatment: A laboratory batch study | La investigación se centra en evaluar cómo los residuos de H ₂ O ₂ influyen en los sistemas de arena (de reactores discontinuos) con énfasis en la eliminación de carbono orgánico disuelto (DOC), el cambio de actividad microbiana y la evolución de la comunidad bacteriana. Para ello adicionaron diferentes concentraciones de H ₂ O ₂ a los reactores, y evaluaron el efecto de este en las comunidades microbianas; para ello utilizaron pirosecuenciación 454 y para la alineación se usó el software NAST. Algunos de los géneros |

| | |
|--|---|
| | <p>más abundantes fueron: <i>Zoogloea</i>, <i>Fusibacter</i> y <i>Geobacter</i>. Los autores concluyen mencionando que la alta concentración de H₂O₂ suprimió la diversidad de la comunidad bacteriana y su actividad; las bacterias anaerobias son sensibles al de H₂O₂. Su crecimiento estaba limitado por de H₂O₂.</p> |
| <p>[12] Effect of advanced oxidation on N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation and microbial ecology during pilot-scale biological activated carbon filtration</p> | <p>El artículo muestra un contraste entre la oxidación avanzada y la biofiltración por carbón activado, usando UV/ H₂O₂. Para el análisis microbiano se usó Illumina MiSeq y el marcador RNAr16S, las secuencias del gen 16S rRNA se desmultiplexaron y procesaron utilizando la tubería Quantitative Insights Into Microbial Ecology, obteniéndose una agrupación de 200 OTUs. También se usó qPCR para cuantificar los genes de desnitrificación <i>nirS</i> y <i>nirK</i>. Dentro de la distribución filogenética se encontraron: <i>Nitrospirae</i>, <i>Bacteroidetes</i>, <i>Planctomycetes</i>, <i>Chloroflexi</i> y <i>Firmicutes</i>, <i>Alphaproteobacteria</i>, <i>Betaproteobacteria</i>, <i>Gammaproteobacteria</i>, y <i>Acidobacteria</i>. En conclusión, los tratamientos con AOP generan cambios en las comunidades microbianas usadas en la biofiltración, igualmente los pretratamientos con ozono versus UV/ H₂O₂ producen cambios en los atributos estructurales y funcionales de la población microbiana general de BAC.</p> |
| <p>[13] Simultaneous removal of antibiotic resistant bacteria, antibiotic resistance genes, and micropollutants by a modified photo-Fenton process</p> | <p>El estudio usó un enfoque analítico en donde empleó un proceso foto-Fenton modificado para eliminar simultáneamente ARG, ARB y microcontaminantes en matrices de una planta de tratamiento de aguas residuales a gran escala. Para determinar los ARG y ARB usaron qPCR. Encontraron que una dosis baja que comprendía Fe (III) y H₂O₂, era eficaz para disminuir la ARB en 6 log en 30 minutos y los e-ARG en 6 log. dentro de 10 min y no producir un nuevo crecimiento de ARB después de 48 horas. El estudio demostró una solución óptima para mitigar los ARG, ARB y microcontaminantes.</p> |
| <p>[14] FeOx@GAC catalyzed microbubble ozonation coupled with biological process for industrial phenolic wastewater treatment: Catalytic performance, biological process screening and microbial characteristics</p> | <p>La investigación tuvo como objetivo explicar la actividad catalítica de un catalizador de carbón activado granular (GAC) dopado con óxidos de hierro (FeO x) (FeO x @GAC) en la ozonización de microburbujas para el tratamiento de PWW. Para ello usaron como AOP la ozonización acoplada con un tratamiento de aguas residuales industriales fenólicas. Para evaluar la eficiencia del tratamiento de los compuestos extracelulares y microbianos usaron la secuenciación de alto rendimiento del ARNr16S, revelando el predominio del filo <i>Proteobacteria</i>, la clase <i>Alphaproteobacteria</i> y los géneros <i>Mycobacterium</i>, <i>Gordonia</i>, <i>Pedomicrobium</i> y <i>DeFluviimonas</i>, esto se pudo establecer mediante Illumina MiSeq con las secuencias obtenidas utilizando UPARSE.</p> |
| <p>[15] Treatment of wastewater effluents from Bogotá – Colombia by the photo-electro-Fenton process: Elimination of bacteria and pharmaceutical</p> | <p>En el trabajo estudiaron las ocurrencias de familias de bacterias y fármacos relevantes en efluentes de aguas residuales municipales de Bogotá, y su tratamiento por el proceso foto-electro-Fenton. Evaluaron el tratamiento en efluentes reales de una planta de tratamiento de aguas residuales. Para los análisis metagenómicos usaron TruSeq Nano DNA LT de Illumina, identificando familias de bacterias relacionadas con enfermedades transmitidas por el agua y los alimentos en dichos efluentes como: <i>Pseudomonadaceae</i>, <i>Campylobacteraceae</i>, <i>Aeromonadaceae</i>, <i>Enterobacteriaceae</i> y <i>Bacteroidaceae</i>. Dentro de los resultados con este AOP está la reducción significativa (>85%) del ADN total, y durante 60 minutos condujo a una disminución del contenido bacteriano en las muestras originales. Por su parte una remoción del 66,12% para los fármacos.</p> |

| | |
|---|--|
| <p>[16] Treatment of pharmaceutical wastewater by ionizing radiation: Removal of antibiotics, antimicrobial resistance genes and antimicrobial activity</p> | <p>El estudio, investigó tratamiento de aguas residuales farmacéuticas reales de una fábrica de producción de eritromicina mediante irradiación gamma. Evaluaron el tratamiento de los ARG y la degradación de los fármacos. Usaron HT-PCR, qPCR, e Illumina Miseq para analizar la comunidad bacteriana, para ello tomaron como marcador al RNAr16S. Como resultados se identificaron una variedad de 7 grupos de ARG y 9 filos bacterianos en aguas residuales sin tratar; también se encontró que se presentaron los cambios en la abundancia relativa de bacterias a nivel de filo y los 20 géneros principales durante la irradiación gamma. La eliminación de los ARG alcanzó más del 97%.</p> |
|---|--|

Como parte del análisis de cada uno de los artículos pertenecientes al portafolio final, las familias de microorganismos, más hallados en aguas (con algunos de sus representantes) usando metagenómica fueron:

- Enterobacteriaceae:
Salmonella typhimurium,
Escherichia coli,
- Bacillaceae: *Bacillus subtilis*,
- Pseudomonadaceae:
Pseudomona aeruginosa,
- Intrasporangiaceae:
Tetrasphaera
- Carnobacteriaceae:
Trichococcus
- Microtrichaceae:
Candidatus Microthrix
- Comamondaceae:
Rhodofera, *Aquabacterium*
sp
- Rhodobacteraceae:
Rhodobacter, *Thauera sp*,
Defluviimonas
- Hyphomicrobiaceae:
Hyphomicrobium,
Pedomicrobium
- Flavobacteriaceae:
Flavobacterium sp
- Nitrospiraceae: *Nitrospira*
sp, *Nitrospirae*
- Gallionellaceae:
Candidatus Nitrotoga
arctica
- Enterococcaceae: *E. faecalis*
- Mycobacteriaceae:
Mycobacterium
- Gordoniaceae: *Gordonia*
- Campylobacteraceae
- Aeromonadaceae
- Bacteroidaceae

Muchas de las bacterias no son plenamente identificadas taxonómicamente, ya que comparten genes con otras familias de bacterias como lo es el caso de *Candidatus nitrotoga arctic*; por lo que, aunque la metagenómica permite identificar genes y poder a través de la bioinformática realizar su análisis filogenético, aun muchos microorganismos identificados no tienen su clasificación del todo clara. En consecuencia, se hace sumamente relevante continuar con el estudio de estas comunidades microbianas en aguas residuales antes y después de los tratamientos con AOP.

Finalmente, los genes de resistencia más estudiados en los diferentes artículos del portafolio final están:

- OXA
- PBP
- Sul 1, 2, 3, 4
- CARB-5
- bac-A
- tet(W)
- tet (O)
- bla_{TEM}-1, bla_{OXA}-10, bla_{OXA}-1, bla_{DHA}-1, bla_{SHV}-1, bla_{GES}-1
- BlactX-M
- qnrS, qnrA, qnrD, qepA
- intI1
- ampC

estos genes son responsables de generar resistencia a antibióticos como: betalactámicos, fluoroquinolonas, sulfonamidas, trimetoprimas, e inclusive presencia de integrasas como la intI1.

11. Conclusiones

Teniendo en cuenta que la bibliometría tiene como eje fundamental la medición de indicadores en torno a un área de conocimiento para evaluarla, cuantificarla e interpretar su estado, el presente trabajo pudo establecer que del 100% de los artículos alineados al tema (43 artículos del portafolio primario), tan solo 15 de ellos cumplían con el reconocimiento científico del 85% y 22 de ellos se adherían a las condiciones de ser recientes (< a 2 años) de realizada la investigación, y uno de ellos a la de pertenecer al banco de autores del portafolio primario, contando así con un total de 38 artículos del portafolio final. De este portafolio final se establecieron, analizaron y describieron su crecimiento y tendencias:

Los años que más representaron el número de publicaciones totales con 94,7% fueron del 2016 al 2022, esto pudiendo ser explicado con el auge de las recientes tecnologías moleculares que favorecieron su aplicación en términos de costo y tiempo en estudios de la microbiota en aguas y pudiendo ser afianzada como herramienta evaluativa de los procesos de tratamiento de aguas, específicamente de los AOP. En consecuencia, puede verse relacionado con que el mayor número de publicaciones obedece a países desarrollados como China, Estados Unidos y España que aportan recursos financieros suficientes en ciencia y Tecnología como lo reporta la UNESCO (2019) en su informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, sin embargo, otro factor de importancia para que estos países también estén interesados en el estudio del tema, se encuentra la baja calidad del agua y brechas de infraestructura como lo es para los países de China y Brasil; donde este último supera en publicaciones a España ya que está entre los cinco países con mayor participación en el consumo de antimicrobianos en la producción de alimentos, detrás de China y EE. UU (Dias et al., 2022). Colombia es un país que, aunque tiene dificultades de inversión en ciencia y tecnología, y una básica infraestructura para el tratamiento de aguas, universidades

como la Universidad Nacional, Universidad de Antioquia y la Universidad Antonio Nariño, han realizado investigaciones respecto al tema, a nivel escala de laboratorio, posicionando a Colombia como un país en incursión de este tipo de investigación.

En cuanto a los artículos que mostraron un mayor reconocimiento científico por el número de citas, es coherente visualizar que son las publicaciones de años anteriores al 2020, específicamente entre el 2016 y el 2019 (ya que desde el 2016 incrementa el número de publicaciones), donde estos artículos más citados abordan la importancia de las tecnologías de secuenciación de última generación para conocer la diversidad microbiana, comprender su ecología e interacciones intraespecies y así poder mejorar los procesos de descontaminación de usando lodos activados, y adicionalmente AOP.

Como se dijo anteriormente, China, Estados Unidos, España y Brasil son los países con mayor número de publicaciones, sin embargo al estructurar y analizar las redes de cooperaciones entre los autores de dichos artículos, se encontró que es pobre las relaciones entre grupos de investigación de estos países, pero no ocurre lo mismo entre autores de países iguales; esto puede entenderse a que las publicaciones del tema son de relativo auge, con un nivel de citas no tan alto como publicaciones que tienen más de dos años, y a las limitaciones lingüísticas entre investigadores. De los niveles de co-autoría más altos, están en Brasil, destacándose las autoras Amorim, C y Starling, M y las universidades o entidades: University Center-Catholic of Santa Catarina, Universidade Federal de Viçosa, el instituto René Rachou y la Fundação Oswaldo Cruz.

El comportamiento de las co-autorías, respondían también al tiempo, pues aumentaban y guardaban relación con la creciente publicación de documentos por año a nivel global.

El uso de las palabras clave con más frecuencia demostraron que los intereses principales de investigación se dan en aguas residuales, para tratarlas de contaminantes como antibióticos y genes

de resistencia a antibióticos, como de microorganismos resistentes a antibióticos, por lo que la mayoría de las palabras clave de este tipo reflejan un mayor estudio en estos, usando procesos terciarios de AOP con prevalencia de H_2O_2 , pero también asociados con UV, como se pudo analizar en los enfoques más destacados de los artículos. Para las palabras referidas a métodos moleculares no son especificados, solo se obtienen aquellos enfocados en el estudio del ARNr16S, las comunidades microbianas, los ARB y los ARG a través del análisis metagenómico.

Las áreas temáticas de interés más representativas a en el estudio del tema fueron: las ciencias ambientales, las ingenierías, la química, la bioquímica y genética molecular.

Ahora bien, para determinar el crecimiento y tendencias de investigación sobre el tema de la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas, se puede visualizar todo el panorama de resultados anteriormente planteado, y concluir que el crecimiento se está dando de manera exponencial, en la medida en que los enfoques de las investigaciones están preocupándose cada vez más por evaluar los diferentes tratamientos de aguas, en especial las aguas residuales, usando cada vez más procesos terciarios para eliminar o degradar contaminantes de preocupación emergente, sobre todo los ARG y los ARB. Dentro de las herramientas metodológicas para evaluar las efectividades de los diferentes AOP (sobre todo los Fenton, H_2O_2 , ozonización y UV) se trabaja con metagenómica por pirosecuenciación e Illumina Miseq (escopeta) y la región codificante del gen RNAr 16S, sin embargo, para identificar los ARG se usa con frecuencia qPCR.

Finalmente, a partir de lo trabajado aquí, se observa una tendencia de aumento en los próximos años del número de investigaciones que involucren a la metagenómica con los AOP aplicados al tratamiento de aguas. Adicionalmente, áreas temáticas en microbiología, biología molecular y química, seguirán teniendo una gran incidencia en trabajos de investigación que involucren AOP con metagenómica.

12. Referencias Bibliográficas

- Aboudalle, A., Djelal, H., Domergue, L., Fourcade, F., & Amrane, A. (2021). A novel system coupling an electro-Fenton process and an advanced biological process to remove a pharmaceutical compound, metronidazole. *Journal of Hazardous Materials*, 415(2021), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125705>
- Ahmed, Y., Zhong, J., Yuan, Z., & Guo, J. (2021). Simultaneous removal of antibiotic resistant bacteria, antibiotic resistance genes, and micropollutants by a modified photo-Fenton process. *Water Research*, 197, 117075. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.117075>
- Aldasoro, J., Cantonnet, M., & Cilleruelo, E. (2012). La vigilancia tecnológica y la inteligencia competitiva en los estándares de gestión de la calidad en I+D+i. XVI Congreso de Ingeniería de Organización. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management., 1162–1168. http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2012/SP_04_Gestion_Innovacion_Tecnologica_y_Organizativa//1162-1168.pdf
- Amos, G. C. A., Zhang, L., Hawkey, P. M., Gaze, W. H., & Wellington, E. M. (2014). Functional metagenomic analysis reveals rivers are a reservoir for diverse antibiotic resistance genes. *Veterinary Microbiology*, 171(3–4), 441–447. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2014.02.017>
- Anthony, E. T., Ojemaye, M. O., Okoh, O. O., & Okoh, A. I. (2020). A critical review on the occurrence of resistomes in the environment and their removal from wastewater using apposite treatment technologies: Limitations, successes and future improvement. *Environmental Pollution*, 263(2020), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113791>
- Ardanuy, J. (2012). Breve introducción a la bibliometría. In 2012. Pág (Vol. 1).
- Asano, T., Smith, R., & Tchobanoglous, G. (1990). Agua residual municipal: Tratamiento y características del agua residual regenerada. In *Riego con agua residual municipal regenerada: manual práctico* (Vol. 1, pp. 1–482). <https://www.researchgate.net/publication/230887929>
- Author Corporate: UNESCO World Water Assessment Programme, UNESCO. D.-G. 2017-(Azoulay, A.). writer of foreword. (2019). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: no dejar a nadie atrás. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Educación, La Ciencia y La Cultura*, 215. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>

- Bawiec, A., Paweska, K., & Jarzab, A. (2016). Changes in the microbial composition of municipal wastewater treated in biological processes. *Journal of Ecological Engineering*, *17*(3), 41–46. <https://doi.org/10.12911/22998993/63316>
- Bes Monge, S., Silva, A., & Bengoa, C. (2018). *Manual Técnico sobre Procesos de Oxidación Avanzada aplicados al Tratamiento de Aguas Residuales Industriales* (PROGRAMA CYTED, Vol. 1). https://www.researchgate.net/publication/349737485_Manual_Tecnico_sobre_Procesos_de_Oxidacion_Avanzada_aplicados_al_Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Industriales
- Capodaglio, A. G. (2020). Critical Perspective on Advanced Treatment Processes for Water and Wastewater: AOPs, ARPs, and AORPs. *Applied Science*, *10*(13), 1–27. <https://doi.org/10.3390/app10134549>
- Chevremont, A. C., Boudenne, J. L., Coulomb, B., & Farnet, A. M. (2013). Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-chemical parameters of soil. *Water Research*, *47*(6), 1971–1982. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2013.01.006>
- Coats, E. R., Brinkman, C. K., & Lee, S. (2017). Characterizing and contrasting the microbial ecology of laboratory and full-scale EBPR systems cultured on synthetic and real wastewaters. *Water Research*, *108*, 124–136. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2016.10.069>
- Costa, E. P., Starling, M. C. V. M., & Amorim, C. C. (2021). Simultaneous removal of emerging contaminants and disinfection for municipal wastewater treatment plant effluent quality improvement: a systemic analysis of the literature. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(19), 24092–24111. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12363-5>
- Cydzik-Kwiatkowska, A., & Zielińska, M. (2016). Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* *2016* 32:4, *32*(4), 1–8. <https://doi.org/10.1007/S11274-016-2012-9>
- Daims, H., Taylor, M. W., & Wagner, M. (2006). Wastewater treatment: a model system for microbial ecology. *Trends in Biotechnology*, *24*(11), 483–489. <https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2006.09.002>
- Dávila Rodríguez, M., Guzmán Sáenz, R., Arroyo, H. M., Piñeres Herrera, D., de La, D., Barranco, R., & Caballero-Urbe, C. v. (2009). Bibliometría: conceptos y utilidades para el estudio médico y la formación profesional Bibliometrics: concepts and utility to study and medical training. *Barranquilla (Col.)*, *25*(2), 319–330.

- de Oliveira Lacerda, Rogério Tadeu, Ensslin, L., & Ensslin, S. R. (2012). Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. *Gestão & Produção*, 19(1), 59–78. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000100005>
- Deng, Y., & Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, 1(3), 167–176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- di Cesare, A., Corno, G., Manaia, C. M., & Rizzo, L. (2020). Impact of disinfection processes on bacterial community in urban wastewater: Should we rethink microbial assessment methods? *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104393. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.104393>
- Dias, M. F., Leroy-Freitas, D., Machado, E. C., da Silva Santos, L., Leal, C. D., da Rocha Fernandes, G., & de Araújo, J. C. (2022). Effects of activated sludge and UV disinfection processes on the bacterial community and antibiotic resistance profile in a municipal wastewater treatment plant. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 36088–36099. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-18749-3/FIGURES/4>
- Dutra, A., Ripoll Feliu, V. M., Rolim Ensslin, S., Ensslin, L., & Pupo Goncalves, L. R. (2015). Opportunities for research on evaluation of seaport performance: A systemic analysis from international literature. *African Journal of Business Management*, 9(20), 704–717. <https://doi.org/10.5897/ajbm2015.7833>
- Ensslin, L., Rolim Ensslin, S., & Dutra, A. (n.d.). *PROKNOW-C: UN PROCESO PARA GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA*. Retrieved November 23, 2021, from <http://aicogestion.org/proknow-c/>
- Escobar-Zepeda, A., de León, A. V. P., & Sanchez-Flores, A. (2015). The road to metagenomics: From microbiology to DNA sequencing technologies and bioinformatics. *Frontiers in Genetics*, 6(DEC), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00348>
- Eyers, L., George, I., Schuler, L., Stenuit, B., Agathos, S. N., & el Fantroussi, S. (2004). Environmental genomics: Exploring the unmined richness of microbes to degrade xenobiotics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66(2), 123–130. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1703-6>
- Ferro, G., Polo-López, M. I., & Fernández-Ibáñez, P. (2015). Conventional and New Processes for Urban Wastewater Disinfection: Effect on Emerging and Resistant Microorganisms. In *Advanced Treatment Technologies for Urban Wastewater Reuse*.

- The Handbook of Environmental Chemistry* (Vol. 45, pp. 107–128).
https://doi.org/10.1007/698_2015_390
- Galeano, L. A., Guerrero-Flórez, M., Sánchez, C. A., Gil, A., & Vicente, M. Á. (2019). Disinfection by chemical oxidation methods. *Handbook of Environmental Chemistry*, 67, 257–295. https://doi.org/10.1007/698_2017_179/FIGURES/4
- Garrido Cárdenas, J., Polo López, M., & Oller Alberola, I. (2017). Advanced microbial analysis for wastewater quality monitoring: metagenomics trend. *Appl Microbiol Biotechnol*, 101(20), 7445–7458. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8490-3>
- Garrido-Cárdenas, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). The metagenomics worldwide research. *Current Genetics*, 63(5), 819–829. <https://doi.org/10.1007/s00294-017-0693-8>
- Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB) - United States / Data*. (n.d.). Retrieved September 30, 2022, from <https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=US>
- Gaur, N., Narasimhulu, K., & PydiSetty, Y. (2018). Recent advances in the bio-remediation of persistent organic pollutants and its effect on environment. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1602–1631. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.076>
- Gilbride, K. A., Lee, D. Y., & Beaudette, L. A. (2006). Molecular techniques in wastewater: Understanding microbial communities, detecting pathogens, and real-time process control. *Journal of Microbiological Methods*, 66(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2006.02.016>
- Gorbea-Portal, S. (2016). Una nueva perspectiva teórica de la bibliometría basada en su dimensión histórica y sus referentes temporales. *INVESTIGACIÓN BIBLIOTECOLÓGICA*, 30(70), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.ibbai.2016.10.001>
- Gregorio-Chaviano, O., Limaymanta, C. H., & López-Mesa, E. K. (2020). Análisis bibliométrico de la producción científica latinoamericana sobre COVID-19. *Biomedica : Revista Del Instituto Nacional de Salud*, 40(2), 104–115. <https://doi.org/10.7705/biomedica.5571>
- Hernández-González, V., Sans-Rosell, N., Jové-Deltell, M. C., & Reverter-Masia, J. (2016). Comparación entre Web of Science y Scopus, Estudio Bibliométrico de las Revistas de Anatomía y Morfología. *International Journal of Morphology*, 34(4), 1369–1377. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022016000400032>

- Hernández-Macedo, M. L., López, J. A., Eguiluz, K. I. B., & Salazar-Banda, G. R. (2020). Environmental biotechnology: Challenges and perspectives in applying combined technologies to enhance remediation and renewable energy generation. *Revista Peruana de Biología*, 27(1), 43–48. <https://doi.org/10.15381/rpb.v27i1.17578>
- Hou, J., Chen, Z., Gao, J., Xie, Y., Li, L., Qin, S., Wang, Q., Mao, D., & Luo, Y. (2019). Simultaneous removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from pharmaceutical wastewater using the combinations of up-flow anaerobic sludge bed, anoxic-oxic tank, and advanced oxidation technologies. *Water Research*, 159, 511–520. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.05.034>
- Huang, C. P., Dong, C., & Tang, Z. (1993). ADVANCED CHEMICAL OXIDATION: ITS PRESENT ROLE AND POTENTIAL FUTURE IN HAZARDOUS WASTE TREATMENT. *WASTE MANAGEMENT*, 13(5), 361–377. [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(93\)90070-D](https://doi.org/10.1016/0956-053X(93)90070-D)
- Juárez, R. P. (2020). Análisis bibliométrico de la producción científica internacional relacionada con la saliva. *Revista Cubana de Información En Ciencias de La Salud*, 31(2), 15–25. <https://orcid.org/0000-0001-8950-3373>
- Keiser, J., & Utzinger, J. (2005). Trends in the core literature on tropical medicine: A bibliometric analysis from 1952-2002. *Budapest Scientometrics, and Springer*, 62(3), 351–365.
- Lamas, S., Nascimento, E., & Mazaro, R. (2019). GOBERNANZA Y SUSTENTABILIDAD EN DESTINOS TURÍSTICOS Un análisis del discurso académico. *Estudios y Perspectivas En Turismo*, 28(1), 1002–1020. <https://www.researchgate.net/publication/336262677>
- León-Vargas, F., Arango Oviedo, J. A., & Luna Wandurraga, H. J. (2022). Two Decades of Research in Artificial Pancreas: Insights from a Bibliometric Analysis. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 16(2), 434–445. <https://doi.org/10.1177/19322968211005500>
- Lin, W., Yu, Z., Zhang, H., & Thompson, I. P. (2014). Diversity and dynamics of microbial communities at each step of treatment plant for potable water generation. *Water Research*, 52, 218–230. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.071>
- Linhares, J. E., Pessa, S. L. R., Bortoluzzi, S. C., & da Luz, R. P. (2019). Work ability and functional aging: A systemic analysis of the literature using proknow-c (knowledge development process – Constructivist). *Ciencia e Saude Coletiva*, 24(1), 53–66. <https://doi.org/10.1590/1413-81232018241.00112017>

- Lu, X., Zhang, X. X., Wang, Z., Huang, K., Wang, Y., Liang, W., Tan, Y., Liu, B., & Tang, J. (2015). Bacterial Pathogens and Community Composition in Advanced Sewage Treatment Systems Revealed by Metagenomics Analysis Based on High-Throughput Sequencing. *PLOS ONE*, *10*(5), e0125549. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0125549>
- Lugaresi, N. (2008). *LA GESTIÓN DEL AGUA EN ITALIA*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fundacionmgimenezabad.es/sites/default/files/Publicar/images/Documentos/2008/20080710_epp_lugaresi_n_e_s_o.pdf
- Macías-Quiroga, I. F., Henao-Aguirre, P. A., Marín-Flórez, A., Arredondo-López, S. M., & Sanabria-González, N. R. (2021). Bibliometric analysis of advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment: global and Ibero-American research trends. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(2021), 23791–23811. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11333-7>/Published
- Mardanov, A. v., Kadnikov, V. v., & Ravin, N. v. (2018). Metagenomics: A Paradigm Shift in Microbiology. In *Metagenomics: Perspectives, Methods, and Applications* (pp. 1–13). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102268-9.00001-X>
- Martínez, H. (2018). Metodología de la investigación. In H. Martínez (Ed.), *Protocolo y diseño de la metodología de la investigación*. (Cengage Learning, Vol. 1, pp. 84–132).
- Martínez-Pachón, D., Echeverry-Gallego, R. A., Serna-Galvis, E. A., Villarreal, J. M., Botero-Coy, A. M., Hernández, F., Torres-Palma, R. A., & Moncayo-Lasso, A. (2021). Treatment of wastewater effluents from Bogotá – Colombia by the photo-electro-Fenton process: Elimination of bacteria and pharmaceutical. *Science of the Total Environment*, *772*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144890>
- Md Khudzari, J., Kurian, J., Tartakovsky, B., & Raghavan, G. S. V. (2018). Bibliometric analysis of global research trends on microbial fuel cells using Scopus database. *Biochemical Engineering Journal*, *136*, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.05.002>
- Montaña, J. S. (2015). *APROXIMACIÓN METAGENÓMICA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ENZIMAS LIPOLÍTICAS EN SUELO DE BOSQUE ALTO ANDINO DEL PARQUE NACIONAL NATURAL LOS NEVADOS* [TESIS DE GRADO, PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA]. <http://hdl.handle.net/10554/17002>

- Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577–2641.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>
- Palmas, S., Vacca, A., & Mais, L. (2021). Bibliometric analysis on the papers dedicated to microplastics in wastewater treatments. *Catalysts*, 11(8).
<https://doi.org/10.3390/catal11080913>
- Prasse, C., Stalter, D., Schulte-Oehlmann, U., Oehlmann, J., & Ternes, T. A. (2015). Spoil for choice: A critical review on the chemical and biological assessment of current wastewater treatment technologies. *Water Research*, 87, 237–270.
<https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2015.09.023>
- Richardson, S. D., & Kimura, S. Y. (2017). Emerging environmental contaminants: Challenges facing our next generation and potential engineering solutions. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 40–56.
<https://doi.org/10.1016/J.ETI.2017.04.002>
- Rodríguez-Chueca, J., Varella della Giustina, S., Rocha, J., Fernandes, T., Pablos, C., Encinas, Á., Barceló, D., Rodríguez-Mozaz, S., Manaia, C. M., & Marugán, J. (2019). Assessment of full-scale tertiary wastewater treatment by UV-C based-AOPs: Removal or persistence of antibiotics and antibiotic resistance genes? *Science of The Total Environment*, 652, 1051–1061.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.10.223>
- Torres Andrade, G. F. (2014). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE OXIDACIÓN Y BIOFILTROS* [Tesis Doctoral, Universidad de las palmas de Gran Canaria].
<http://hdl.handle.net/10553/11899>
- UNESCO. (2021). *UNESCO SCIENCE REPORT The race against time for smarter development*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000377458/PDF/377458eng.pdf.multi>
- Verdejo Martínez, M. J., & Ontalba Ruipérez, A. J. (2011). *ANÁLISIS DE LOS ESTUDIOS MÉTRICOS DE LA INFORMACIÓN PUBLICADOS EN REVISTAS ESPAÑOLAS DE DOCUMENTACIÓN*.
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10352/Analisis_de_los_estudios_metricos_de_la_informacion.pdf
- Vieira, E. L., da Costa, S. E. G., de Lima, E. P., & Ferreira, C. C. (2019). Application of the Proknow-C methodology in the search of literature on performance indicators for

- energy management in manufacturing and industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 39, 1259–1269. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.343>
- Vilela, P. B., Maria, M. C., Mendonça Neto, R. P., de Souza, F. A. R., Pires, G. F. F., & Amorim, C. C. (2022). Solar photo-Fenton mediated by alternative oxidants for MWWTP effluent quality improvement: Impact on microbial community, priority pathogens and removal of antibiotic-resistant genes. *Chemical Engineering Journal*, 441, 136060. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.136060>
- Wang, F., van Halem, D., Liu, G., Lekkerkerker-Teunissen, K., & van der Hoek, J. P. (2017). Effect of residual H₂O₂ from advanced oxidation processes on subsequent biological water treatment: A laboratory batch study. *Chemosphere*, 185, 637–646. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.07.073>
- Wang, J., & Chen, X. (2020). Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview. *https://Doi.Org/10.1080/10643389.2020.1835124*, 52(4), 571–630. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835124>
- Wang, J., Chu, L., Wojnárovits, L., & Takács, E. (2020). Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview. *The Science of the Total Environment*, 744. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140997>
- Yang, Y., Yu, K., Xia, Y., Lau, F. T. K., Tang, D. T. W., Fung, W. C., Fang, H. H. P., & Zhang, T. (2014). Metagenomic analysis of sludge from full-scale anaerobic digesters operated in municipal wastewater treatment plants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(12), 5709–5718. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5648-0>
- Yuan, Q. bin, Huang, Y. M., Wu, W. bin, Zuo, P., Hu, N., Zhou, Y. Z., & Alvarez, P. J. J. (2019). Redistribution of intracellular and extracellular free & adsorbed antibiotic resistance genes through a wastewater treatment plant by an enhanced extracellular DNA extraction method with magnetic beads. *Environment International*, 131, 104986. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.104986>
- Zhang, C., Li, Y., Shen, H., & Shuai, D. (2021). Simultaneous coupling of photocatalytic and biological processes: A promising synergistic alternative for enhancing decontamination of recalcitrant compounds in water. *Chemical Engineering Journal*, 403, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126365>

13. Anexos

Figura complementaria 1: Cuadro comparativo entre bibliometría, informetría, cibermetría, cienciometría y webmetría.

| | Bibliometría | Cienciometría | Informetría | Cibermetría | Webmetría |
|--|--|---|--|---|--|
| Marco teórico conceptual e interdisciplinario | # Bibliografía | # Cienciología | # Ciencia de la Información | | |
| Objeto de estudio | <ul style="list-style-type: none"> - Libros - Documentos - Revistas - Artículos - Autores - Usuarios # Actividad bibliográfica | <ul style="list-style-type: none"> - Disciplinas - Materias - Campos - Esferas ▲ Temáticas ▲ Áreas y campos científicos y tecnológicos ▲ Patentes ▲ Disertaciones ▲ Tesis # Actividad científica # Temas | <ul style="list-style-type: none"> - Palabras - Documentos - Bases de datos ▲ Comunicaciones informales (incluso en ámbitos no científicos) ▲ Homepages en la WWW # Actividad científico-informativa | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Recursos de información, estructuras y tecnologías en Internet (Martínez Rodríguez, 2006) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Aspectos cuantitativos de la construcción y uso de los recursos de información, estructuras y tecnologías en la web (Arroyo <i>et al.</i>, 2005) |
| Fuentes | <ul style="list-style-type: none"> # Repertorios bibliográficos # Índices de difusión de la ciencia # Bases de datos bibliográficas y factográficas | <ul style="list-style-type: none"> # Curriculum vitae # Ficheros de gestión científica (movilidad y colaboración científica, recursos materiales y financieros) | <ul style="list-style-type: none"> # Propias del análisis de contenido (resumen, reseña analítica) # Bases de datos de texto completo | | |
| Variables | <ul style="list-style-type: none"> - Nº de préstamos circulación (préstamos) - Nº de citas - Frecuencia de aparición de palabras - Longitud de las oraciones ▲ Frecuencia de la extensión de frases | <ul style="list-style-type: none"> - Factores que diferencian la subdisciplinas - Revistas - Autores - Trabajos - Modelo en que se comunican los científicos | <ul style="list-style-type: none"> - Difiere de la cienciometría en el propósito de las variables, p. ej. medir la recuperación, la relevancia, la revocación | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Herramientas de búsqueda ◆ Revistas ◆ Autores ◆ Descarga de artículos en PDF, PPT, DOC, PPS ◆ Densidad de la palabra ◆ Dominios ◆ Comentarios ◆ Etc. (RABID, 2007) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Hots de servidores Web ◆ Usuarios ◆ Dominios ◆ Sitios ◆ Sitios institucionales ◆ Etc. (Aguillo, 2006) |
| Métodos | <ul style="list-style-type: none"> - Clasificación - Frecuencia - Distribución ▲ Ranking | <ul style="list-style-type: none"> - Análisis de conjuntos y correspondencia ▲ Co-aparición de términos ▲ Expresiones ▲ Palabra-clave ▲ Etc. | <ul style="list-style-type: none"> - Modelo vector-espacio - Modelos booleanos de recuperación - Modelos probabilísticos - Lenguaje de procesamiento - Enfoque basados en el conocimiento - Tesoros | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Clasificación ◆ Frecuencia ◆ Distribución ◆ Modelos estadísticos (Martínez, 2006) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Técnicas bibliométricas para el estudio de la relación entre diferentes sitios de la Web (Aguillo, 2006) |
| Objetivos | <ul style="list-style-type: none"> - Asignar recursos: personal, tiempo, dinero, etc. | <ul style="list-style-type: none"> - Identificar campos de interés. Lugares de concentración temática - Comprender cómo y cuando se comunican los científicos | <ul style="list-style-type: none"> - Mejorar la eficiencia de la recuperación de la información ▲ Identificar estructuras y relaciones dentro de los diversos sistemas de información | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Realiza investigaciones cuantitativas en la información electrónica del Ciberspacio (Dahal, 1999 en RABID, 2007) | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Analiza los componentes de la Web (Gregorio, 2004) |

Tabla 1. Cuadro comparativo de las disciplinas métricas
 (Fuentes: - McGrath (citado por Macias-Chapula 2001, p. 36); ▲ Vanti (2000, pp. 18-19); # Gorbea (2005, p. 138); ◆ López (2007))

Obtenido de: (Verdejo Martínez & Ontalba Ruipérez, 2011)

Figura complementaria 2: Etapas del método PROKNOW-C

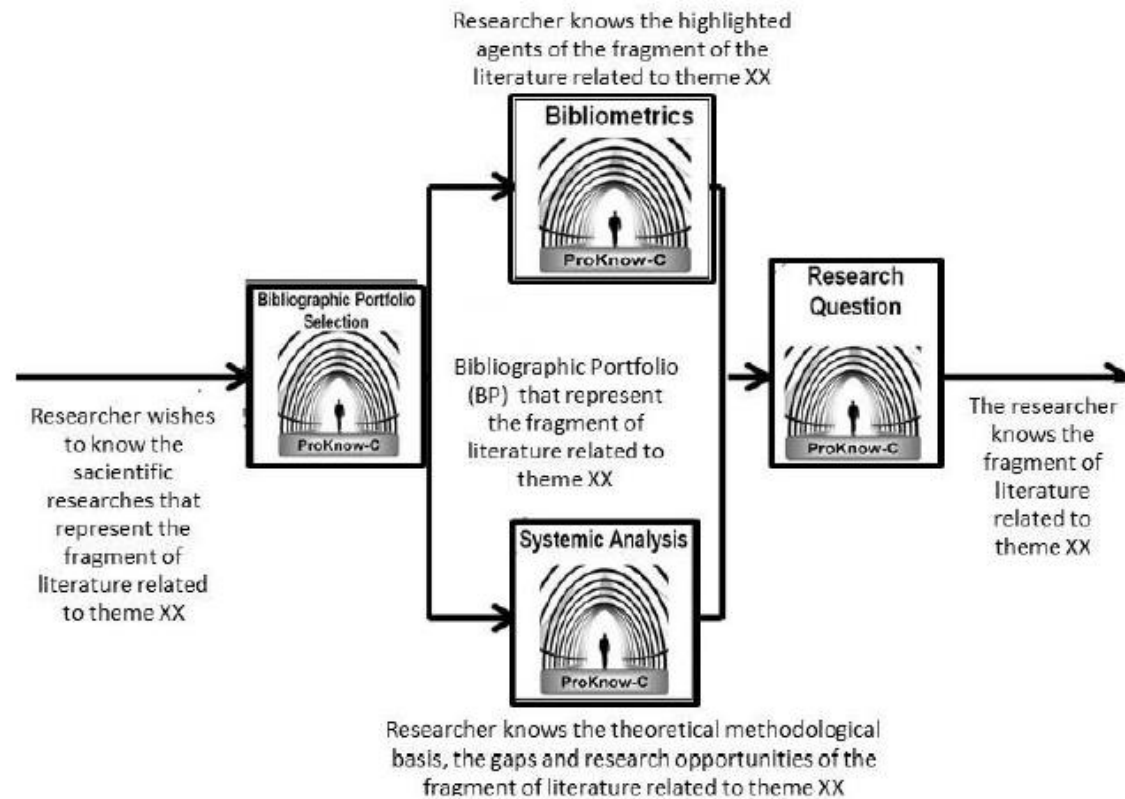
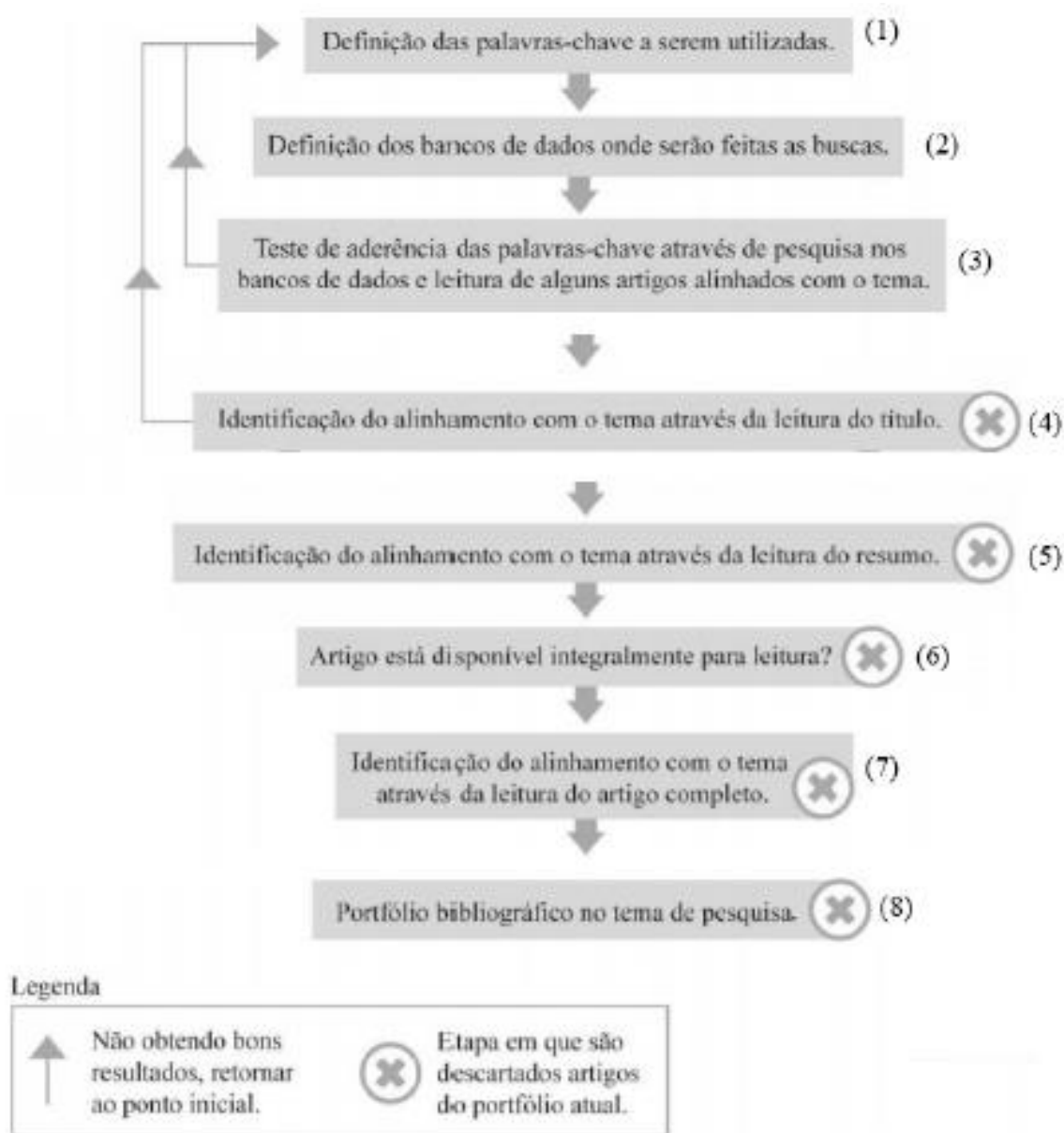


Figura 1. *ProKnow-C* su paso. Fuente: Adaptado de Ensslin, Ensslin y Pinto (2013); Lacerda, Ensslin y Ensslin (2012); y Tasca et al. (2010).

Obtenido de: (Dutra et al., 2015)

Figura complementaria 3: Diagrama de flujo método PROKNOW-C



Obtenida de: (Lamas et al., 2019)

Figura complementaria 4: Análisis metagenómico y bioinformático de la comunidad microbiana.

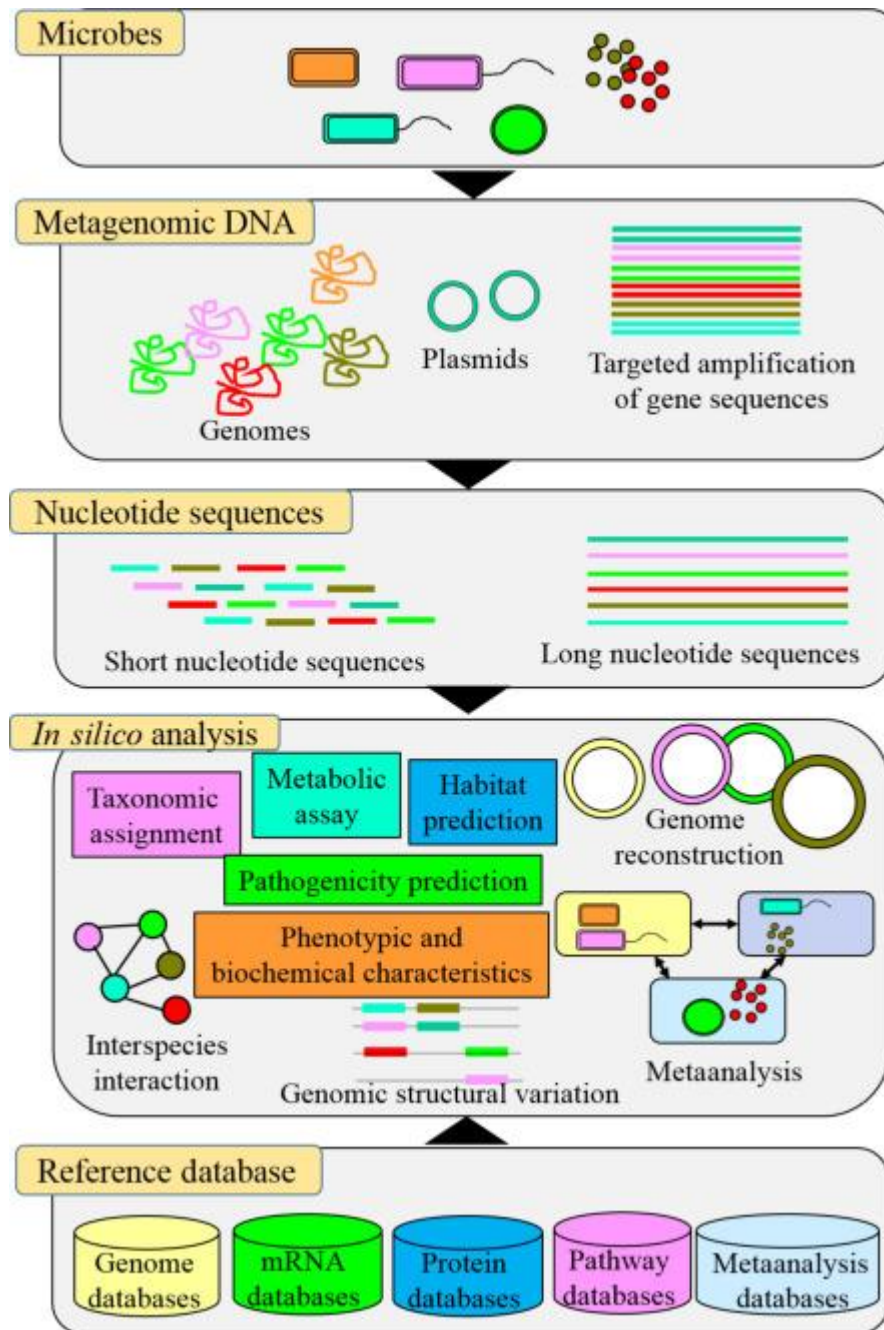


Imagen de: Dash, H y Das, S. (2018).

<https://doi.org/10.1016/bs.mim.2018.07.005>

Figura complementaria 5: Varios Procesos de Oxidación Avanzadas.

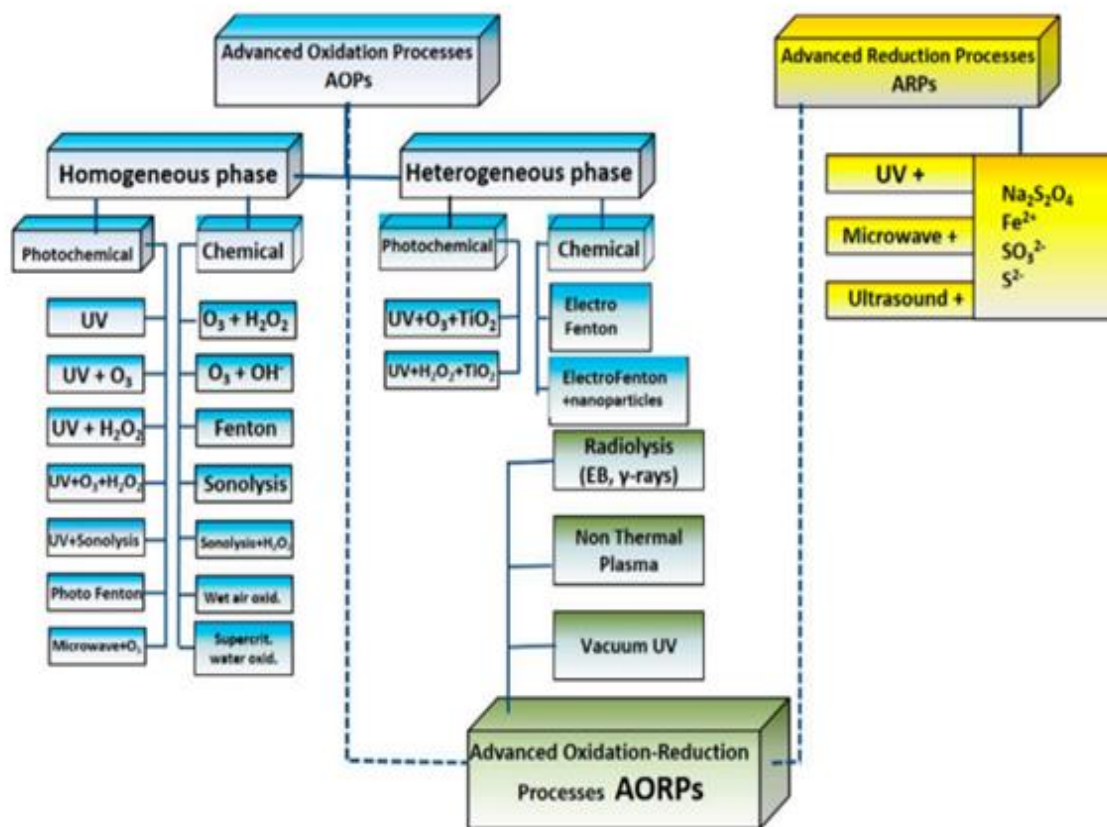
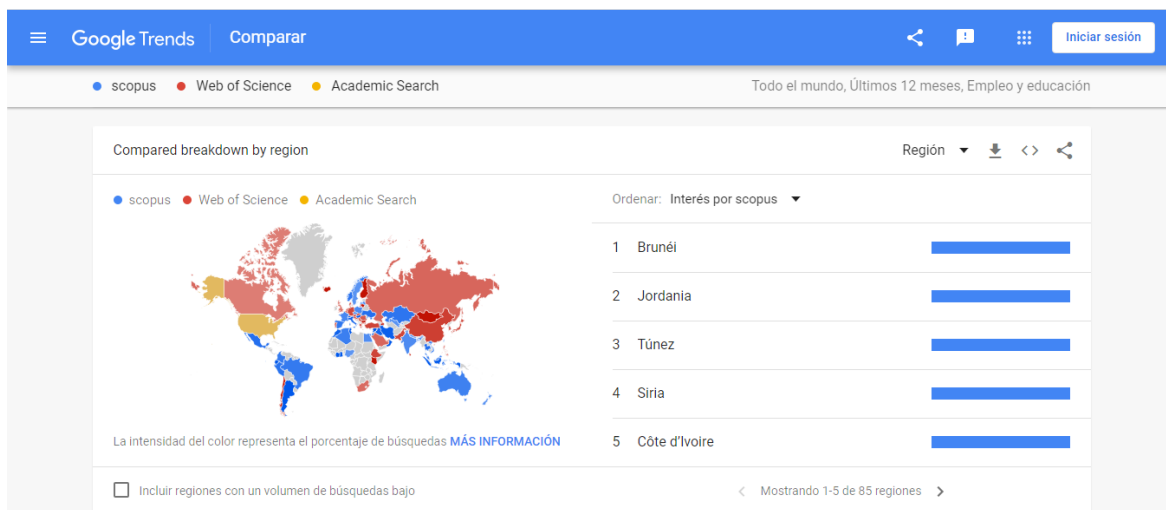
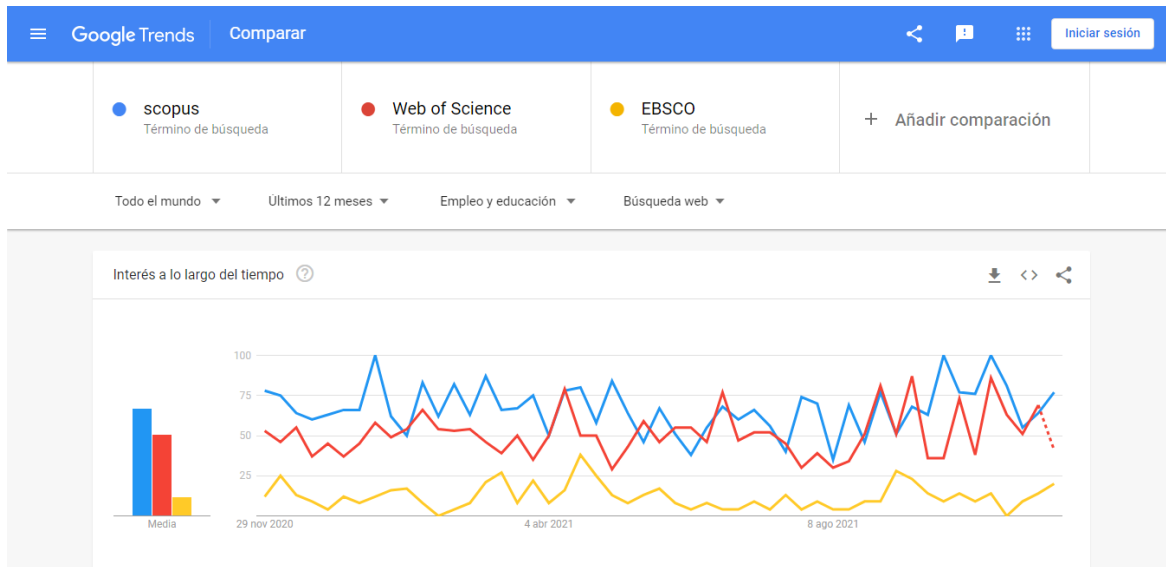


Imagen de: Capodaglio, AG (2020)
<https://doi.org/10.3390/app10134549>

Figura complementaria 6: Comparación de tendencias de uso de las bases de datos más usadas a nivel mundial en temas de educación y empleo:



Imágenes de: <https://www.google.com/trends> (2021).

Tabla complementaria 1: Etapas de búsqueda de información basadas en la norma UNE 166006:2011

Table 1 Stages in the methodology based on UNE 166006:2011

| Stage | Description |
|--|--|
| Identification | In the first step, keywords and some questions to be answered were selected to be identified through the bibliometric analysis: <ol style="list-style-type: none"> 1. What is the number of publications in the world and Ibero-America during the last 38 years? 2. How are the scientific publications distributed by continents and countries? 3. How is the cooperation network of Ibero-American countries structured? 4. How is the research trend in AOPs distributed (subject area, authors, institutions, and journals with greater number of publications)? 5. How are authors and institutions distributed in the networks? 6. Which are the most relevant co-authorship associations? 7. What keywords have been the most frequently used from 1980 to 2018? 8. What keywords have been the most frequently used by cluster and network? |
| Planning | The search strategy was selected using a software tool and some thesauruses to identify acronyms, homonyms, and synonyms of keywords. Besides, databases (Scopus and WoS) were chosen for retrieving the information and comparing results obtained through different search strategies, applied to select the best search option to retrieve the largest number of publications on AOPs. |
| Data collection: search, capture, and selection of information | In the third step, after defining the search strategy to be applied in Scopus and WoS, dataset results were exported from scientific databases to the VantagePoint software. Data were retrieved from WoS on September 11, 2018, and Scopus on September 12, 2018. Bibliometric data from Scopus and WoS were combined. Then, all double-counted publications were removed and homonyms were identified. |
| Organization, analysis, and validation of information | In the fourth step, data generated on AOPs were evaluated to answer questions through graphs and tables. Data extracted from Scopus and WoS might contain errors such as spelling mistakes in the author's name, journal title, or reference list. For this reason, a bibliometric analysis was not being directly applied to data from the bibliographic sources, so pre-processing on data become necessary (verification). Raw data were manually organized and standardized because some characters (e.g., chemical formulas and equations) were not recognized by the VantagePoint software. Similarly, homonymous authors and institutions were identified for all records retrieved. This step took nine months to be concluded due to the large numbers of data. |
| Dissemination of results | Processed data were organized through tables, figures, and images. Then they were made available for the scientific community as attachment of this article. |

Tabla 1: Etapas de la metodología basadas en UNE 166006:2011
Tomada de: (Macías-Quiroga et al., 2021a)

Tabla complementaria 2: Portafolio bibliográfico primario de 43 artículos.

| # | Año | Autores | Nombre del artículo |
|---|------|--|---|
| 1 | 2013 | A.-C. Chevremonta, J.-L. Boudennea, B. Coulomb, A.-M. Farnet | Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-chemical parameters of soil. |
| 2 | 2015 | Xin Lu, Xu-Xiang Zhang, Zhu Wang, Kailong Huang, Yuan Wang, Weigang Liang, Yunfei Tan, BoLiu, Junying Tang | Bacterial Pathogens and Community Composition in Advanced Sewage Treatment Systems Revealed by Metagenomics Analysis Based on High-Throughput Sequencing. |
| 3 | 2016 | Michael D. Marsolek, Bruce E. Rittmann | Effect of substrate characteristics on microbial community structure, function, resistance, and resilience; application to coupled photocatalytic-biological treatment. |
| 4 | 2016 | Agnieszka Cydzik-Kwiatkowska1, Magdalena Zielinska | Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems. |
| 5 | 2017 | Feifei Wang, Doris van Halem, Gang Liu, Karin Lekkerkerker-Teunissen, Jan Peter van der Hoek | Effect of residual H2O2 from advanced oxidation processes on subsequent biological water treatment: A laboratory batch study. |
| 6 | 2017 | Dong Li, Ben Stanford, Eric Dickenson, Wendell O. Khunjar, Carissa L. Homme, Erik J. Rosenfeldt, Jonathan O. Sharp | Effect of advanced oxidation on N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation and microbial ecology during pilot-scale biological activated carbon filtration. |
| 7 | 2017 | Erik R. Coats, Cynthia K. Brinkman, Stephen Lee | Characterizing and contrasting the microbial ecology of laboratory and full-scale EBPR systems cultured on synthetic and real wastewaters. |
| 8 | 2017 | Luis-Alejandro Galeano, Milena Guerrero-Flórez, Claudia-Andrea Sánchez, Antonio Gil, and Miguel-Ángel Vicente | Disinfection by Chemical Oxidation Methods. |

| | | | |
|----|------|--|---|
| 9 | 2017 | José Antonio Garrido-Cárdenas, María Inmaculada Polo-López, Isabel Oller-Alberola | Advanced microbial analysis for wastewater quality monitoring: metagenomics trend. |
| 10 | 2018 | Gaur, Nisha, Narasimhulu, Korrapati, Narasimhulu, Korrapati | Recent advances in the bio-remediation of persistent organic pollutants and its effect on environment. |
| 11 | 2018 | Noa Aharonia, Hadas Mamaneb, Dvora Biran, Anat Lakretzb, Eliora Z. Ron | Gene expression in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> exposed to hydroxyl-radicals. |
| 12 | 2019 | J. Rodríguez-Chueca, C. García-Cañibano, R.-J. Lepistö, Á. Encina, J. Pellinen, J. Marugán | Intensification of UV-C tertiary treatment: Disinfection and removal of micropollutants by sulfate radical based Advanced Oxidation Processes. |
| 13 | 2019 | Jie Houa, Zeyou Chena, Ju Gaoa, Yonglei Xiec, Linyun Lia, Songyan Qinc, Qing Wang, Daqing Maob, Yi Luo | Simultaneous removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from pharmaceutical wastewater using the combinations of up-flow anaerobic sludge bed, anoxic-oxic tank, and advanced oxidation technologies. |
| 14 | 2019 | Luciano de Oliveira Gonçalves, Maria Clara V. M. Starling, Cintia Dutra Leal, Daniel V. M. Oliveira, Juliana Calábria Araújo, Mônica Maria D. Leão Camila C. Amorim | Enhanced biodiesel industry wastewater treatment via a hybrid MBBR combined with advanced oxidation processes: analysis of active microbiota and toxicity removal. |
| 15 | 2019 | Amrita Bains, Octavio Perez-Garcia, Gavin Lear, David Greenwood, Simon Swift, Martin Middleditch, Edward P. Kolodziej, and Naresh Singha | Induction of Microbial Oxidative Stress as a New Strategy to Enhance the Enzymatic Degradation of Organic Micropollutants in Synthetic Wastewater. |
| 16 | 2019 | Jorge Rodríguez-Chueca, Saulo Varella della Giustinac, Jaqueline Rocha, Telma Fernandes, Cristina Pablos, Ángel Encinas, Damià Barceló, Sara Rodríguez-Mozaz, Céilia M. Manaia, Javier Marugán | Assessment of full-scale tertiary wastewater treatment by UV-C based-AOPs: Removal or persistence of antibiotics and antibiotic resistance genes? |

| | | | |
|----|------|--|---|
| 17 | 2020 | Jianlong Wang, Xiaoying Chen | Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview. |
| 18 | 2020 | Zhirui Qin, Zhenhu Zhao, Wentao Jiao, Ziyu Han, Liling Xi, Yinqing Fang, Shiyu Wang, Longjie Ji, Ying Jiang | Coupled photocatalytic-bacterial degradation of pyrene: Removal enhancement and bacterial community responses. |
| 19 | 2020 | Qian Zhao, Mei Li, Kefeng Zhang, Ning Wang, Kaikai Wang, Hongbo Wang, Shujuan Meng, Ruimin Mu | Effect of ultrasound irradiation combined with ozone pretreatment on the anaerobic digestion for the biosludge exposed to trace-level levofloxacin: Degradation, microbial community and ARGs analysis. |
| 20 | 2020 | Lei Chen, Zhi Zhou, Chaofeng Shen and Yilu Xu | Inactivation of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes by electrochemical oxidation/electro-Fenton process. |
| 21 | 2020 | Juntao Xia, Haohao Sun, Xueyan Ma, Kailong Huang, Lin Ye | Ozone pretreatment of wastewater containing aromatics reduces antibiotic resistance genes in bioreactors: The example of p-aminophenol. |
| 22 | 2020 | Weidong Chena, Jie Weia, Zhiguo Sua,d, Linwei Wub, Min Liuc, Xiaoxuan Huang, Pengcheng Yaoe, Donghui Wen | Deterministic mechanisms drive bacterial communities assembly in industrial wastewater treatment system. |
| 23 | 2020 | Jianlong Wang, Libing Chu, László Wojnárovits, Erzsébet Takács | Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview. |
| 24 | 2021 | Diana Martínez-Pachón, Rodrigo A. Echeverry-Gallego, Efraím A. Serna-Galvis, José Miguel Villarreal, Ana María Botero-Coy, Félix Hernández, Ricardo A. Torres-Palma, Alejandro Moncayo-Lasso | Treatment of wastewater effluents from Bogotá – Colombia by the photo-electro-Fenton process: Elimination of bacteria and pharmaceutical. |

| | | | |
|----|------|---|---|
| 25 | 2021 | Libing Chu, Jianlong Wang, Shijun He, Chuanhong Chen, Laszlo Wojnarovits, Erzsébet Takacs | Treatment of pharmaceutical wastewater by ionizing radiation: Removal of antibiotics, antimicrobial resistance genes and antimicrobial activity. |
| 26 | 2021 | Shijie Yao, Jianfeng Y, Qing Yang, Yaru Hu, Tianyang Zhang, Lei Jiang, Salvator Munezero, Kuangfei Lin Changzheng Cui | Occurrence and removal of antibiotics, antibiotic resistance genes, and bacterial communities in hospital wastewater. |
| 27 | 2021 | Xuening Fei, Songya Li, Linpei Wang, Le Wang and Fuqiang Chen | Impact of light on anoxic/oxic reactors: performance, quorum sensing, and metagenomic characteristics. |
| 28 | 2021 | Shihai Deng, Lakshmi Jothinathan, Qinqing Cai, Rui Li, Mengyuan Wu, Say Leong Ong, Jiangyong Hu | FeOx@GAC catalyzed microbubble ozonation coupled with biological process for industrial phenolic wastewater treatment: Catalytic performance, biological process screening and microbial characteristics. |
| 29 | 2021 | Marcela França Dias · Deborah Leroy-Freitas · Elayne Cristina Machado · Leticia da Silva Santos · Cintia Dutra Leal · Gabriel da Rocha Fernandes · Juliana Calábria de Araújo | Effects of activated sludge and UV disinfection processes on the bacterial community and antibiotic resistance profile in a municipal wastewater treatment plant. |
| 30 | 2021 | Pâmela B. Vilela, Rondon P. Mendonça Neto, Maria Clara V.M. Starling, Alessandrada S. Martins, Giovanna F.F. Pires, Felipe A.R. Souza, Camila C. Amorim | Metagenomic analysis of MWWTP effluent treated via solar photo-Fenton at neutral pH: Effects upon microbial community, priority pathogens, and antibiotic resistance genes. |
| 31 | 2021 | Iván F. Macías-Quiroga y Paula A. Henao-Aguirre y Alexander Marín-Flórez y Sandra M. Arredondo-López y Nancy R. Sanabria-González | Bibliometric analysis of advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment: global and Ibero-American research trends. |
| 32 | 2021 | Sydney L. Vinge, James S. Rosenblum, Yarrow S. Linden, Adrian Saenz, Natalie M. Hull, and Karl G. Linden | Assessment of UV Disinfection and Advanced Oxidation Processes for Treatment and Reuse of Hydraulic Fracturing Produced Water. |

| | | | |
|----|------|--|---|
| 33 | 2021 | Chi Zhanga, Yi Lib, Hongchen Shenc, Danmeng Shuai | Simultaneous coupling of photocatalytic and biological processes: A promising synergistic alternative for enhancing decontamination of recalcitrant compounds in water. |
| 34 | 2021 | Yunus Ahmed, Jiexi Zhong, Zhiguo Yuan, Jianhua Guo | Simultaneous removal of antibiotic resistant bacteria, antibiotic resistance genes, and micropollutants by a modified photo-Fenton process. |
| 35 | 2021 | Pamela B. Vilela, Alessandra S. Martins, Maria Clara V.M. Starling, Felipe A.R. de Souza, Giovana F.F. Pires, Ananda P. Aguilarb, Maria Eduarda A. Pintob, Tiago A.O. Mendesb, Camila C. de Amorim | Solar photon-Fenton process eliminates free plasmid DNA harboring antimicrobial resistance genes from wastewater. |
| 36 | 2022 | Pamela B. Vilela, Maria Clara V.M. Starling, Rondon P. Mendonça Neto, Felipe A.R. de Souza, Giovanna F.F. Pires, Camila C. Amorim | Solar photo-Fenton mediated by alternative oxidants for MWWTP effluent quality improvement: Impact on microbial community, priority pathogens and removal of antibiotic-resistant genes. |
| 37 | 2022 | Gulnara Maniakova, María Inmaculada Polo-López, Isabel Oller, María Jesús Abeledo-Lameiro, Sixto Malato, Luigi Rizzo | Simultaneous disinfection and microcontaminants elimination of urban wastewater secondary effluent by solar advanced oxidation sequential treatment at pilot scale. |
| 38 | 2022 | Wiktor Zieliński, Jakub Hubeny, Martyna Buta-Hubeny, Damian Rolbiecki, Monika Harnisz, Łukasz Paukzto, Ewa Korzeniewska | Metagenomics analysis of probable transmission of determinants of antibiotic resistance from wastewater to the environment – A case study. |
| 39 | 2022 | Xiaoqing Meng, Fangjuan Li, Li Yia, Mahlatsi Yorgan Dieketsenga, Xiaomeng Wanga, Lixiang Zhoua, Guanyu Zheng | Free radicals removing extracellular polymeric substances to enhance the degradation of intracellular antibiotic resistance genes in multi-resistant <i>Pseudomonas putida</i> by UV/H ₂ O ₂ and UV/peroxydisulfate disinfection processes. |

| | | | |
|----|------|--|--|
| 40 | 2022 | Guangqiang Caia, Tongzhou Liua, Jinsong Zhanga, Haoran Song, Qijun Jiang, Chang Zhou | Control for chlorine resistant spore forming bacteria by the coupling of pre-oxidation and coagulation sedimentation, and UV-AOPs enhanced inactivation in drinking water treatment. |
| 41 | 2022 | Takashi Azuma ¹ , Masaru Usui ² and Tetsuya Hayash | Inactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria in Wastewater by Ozone-Based Advanced Water Treatment Processes. |
| 42 | 2022 | F. Pirasa, G. Nakhlab, S. Murgoloc, C. De Cegliec, G. Mascoloc, K. Belld, T. Jeannee, G. Melea, D. Santoro | Optimal integration of vacuum UV with granular biofiltration for advanced wastewater treatment: Impact of process sequence on CECs removal and microbial ecology. |
| 43 | 2022 | Qingyun Zhai· Lili Song· Xiyan Ji· Yueshu Yu· Jing Ye · Wenwu Xu · Meifang Hou | Research progress of advanced oxidation technology for the removal of <i>Microcystis aeruginosa</i> : a review. |

Nota: Elaboración propia, 2022.

Tabla complementaria 3. Palabras más frecuentes en los artículos del portafolio primario.

| Palabra | Color (cluster) |
|--------------------------------|-----------------|
| Anaerobic digestion | Rojo |
| Antimicrobial resistance | |
| Bacteroidetes | |
| Complete removal | |
| Diversity | |
| Firmicute | |
| Gene | |
| Hiroxyl radical | |
| Microbial community | |
| Municipal wastewater treatment | |

| | |
|--|----------|
| Oxidant | Verde |
| Oxidant system | |
| Priority pathogen | |
| Proteobacteria | |
| Solar Fe ₂ S ₂ O | |
| Solar photoFenton | |
| Cabamazepine | |
| Diclofenac | |
| Micropollutant | |
| Modified photo fenton process | |
| Pseudomonadaceae | |
| qPCR | |
| Sequential treatment | |
| Simultaneous removal | |
| Sulfamethoxazole | |
| Synthetic wastewater | |
| Trimethoprim | Azul |
| Biodegradation | |
| Biological process | |
| coupling | |
| Fenton | |
| Hybrid mbbf | |
| Microbubble oxidation | |
| Photo Fenton | |
| Simultaneous coupling | |
| Treatment | |
| Advance oxidation process | Amarillo |
| AOP | |
| Bacterial community | |
| Bacterium | |

| | |
|------------------------------------|------------------|
| H ₂ O ₂ | |
| Mg I H ₂ O ₂ | |
| Microbial ecology | |
| Reactor | |
| Wáter treatment | |
| Antibiotic resistance | morado |
| Degradation | |
| Microorganisms | |
| UV AOP | |
| UV H ₂ O ₂ | |
| Uv irradiaton | |
| uwwtp | |
| Wastewater treatment plant | |
| wwtp | |
| Antibiotic resistance gene | Azul agua marina |
| Antibiotic resistant bacterium | |
| ARB | |
| ARG | |
| Chlorination | |
| Disinfection | |
| Electro fenton process | |
| Extracellular ARG | |
| Antibiotic | Naranja |
| Antimicrobial activity | |
| Antimicrobial resistance gene | |
| Gamma irradiation | |
| Peroxymonosulfate | |
| Pharmaceutical wastewater | |
| tetracycline | |
| Copies 16RNAr | Café |

| | |
|-------------------------------|--------|
| Environment | |
| Hospital wastewater | |
| Metagenomic analysis | |
| Pathogen | |
| Potential pathogen | |
| Removal efficiency | |
| Advanced wastewater treatment | Rosado |
| bioreactor | |
| Ozone | |
| Ozone pretreatment | |
| wastewater | |

Nota: Elaboración propia, 2022.