

DM

**Tratamento de Águas Residuais:  
Uma Visão Geral da Pesquisa  
através da Análise Bibliométrica**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Paula Liliana de Sousa de Sá**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

outubro | 2024



**Tratamento de Águas Residuais:  
Uma Visão Geral da Pesquisa  
através da Análise Bibliométrica**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Paula Liliana de Sousa de Sá**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO  
Sérgio António Neves Lousada





Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

# **Tratamento de Águas Residuais: Uma Visão Geral da Pesquisa através da Análise Bibliométrica**

Licenciada em Engenharia Civil (Pós-Bolonha)

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da Madeira

por

**PAULA LILIANA DE SOUSA DE SÁ**

Orientador

Prof. Doutor Sérgio António Neves Lousada

*(Universidade da Madeira)*

**outubro de 2024**

Título: Tratamento de Águas Residuais: Uma Visão Geral da Pesquisa através da Análise Bibliométrica

Palavras-Chave: Águas Residuais; Análise Bibliométrica; Desinfecção da Água; Drenagem; Tratamento de Águas Residuais; Visão Geral da Literatura.

Keywords: Sewage Wastewaters; Bibliometric Analysis; Water Disinfection; Drainage; Wastewater Treatment; Literature Overview.

Autor: PAULA LILIANA SÁ

FCEE - Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Campus Universitário de Penteada

9020-015 Funchal - Portugal. s/n

Telefone +351 291 705 230

Correio eletrónico: [secretariadocentros@uma.pt](mailto:secretariadocentros@uma.pt)

Funchal, Madeira

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Professor Doutor Sérgio António Neves Lousada, pela paciência, disponibilidade e sempre presente orientação.

Aos meus filhos Ian e Iago e ao meu companheiro Paulo, pela tolerância e apoio constante. Pelas vezes em que ficaram sozinhos, sem a minha presença, para que pudesse prosseguir nos meus estudos, neste percurso que já se revela longo. Pelo amor infinito que nos une. Pelo que crescemos e construímos juntos, a nossa família.

Ao meu irmão Macário e à minha Catarina. Tanto do melhor que sou, provém de vós.

Ao meu amigo Hugo Teixeira, pela presença e apoio permanente. Por acreditar em mim, sempre. Pelo incentivo e pelas recomendações essenciais à conclusão deste trabalho, de várias realizações profissionais e de tantas outras pessoais. O meu primeiro e mais relevante recurso. Aqui chegamos.

Aos Santos, minha família do andar de cima. Há 30 anos, eramos 3, hoje somos 9 e somos muito mais do que números ou palavras podem definir.

Aos meus pais, por serem exemplo de perseverança. Em especial ao meu pai, por ser o exemplo de assertividade que ainda almejo alcançar.

Ao meu afilhado Tomás e ao seu irmão Henrique. O vosso abraço acalma sempre o meu coração. Possamos, sempre, continuar a crescer juntos.

Aos meus afilhados Fábio e Sidónio, pelas gargalhadas, pelos brindes, pela cumplicidade e carinho que nos une. Pela capacidade de perdoar e continuar unidos, seguindo juntos, como sempre.

À minha Raquel e à minha Alcinda, mulheres da minha vida. 20 anos para a frente, 20 anos para trás, mas juntas, ninguém distingue as nossas gargalhadas. Sinto sempre o conforto da vossa mão na minha.

Ao meu amigo Fabrício Jarimba. Foste o último a chegar, mas temos já tantas vivências para recordar.

Ao meu amigo Silvestre Sobrinho, por tanta vez sermos a consciência um do outro.

À minha demais família e amigos, pela presença e carinho.

*Aos meus filhos, Ian e Iago, a luz que surgiu da escuridão  
e que me guia desde a primeira batida do vosso coração.*

*De nenhum fruto queiras só metade.*

*Miguel Torga.*

## RESUMO

O acesso à água potável e ao saneamento de águas residuais ainda é limitado ou inexistente para milhões de pessoas. Grande percentagem das águas residuais regressa à natureza sem o tratamento adequado e sem o necessário aproveitamento para reutilização. Os efluentes industriais são, cada vez mais, caracterizados por contaminantes recalcitrantes, com maior grau de complexidade, o que dificulta a sua remoção. Isto exige da comunidade académica, empresas e estado o investimento em tecnologias de tratamento de águas residuais ou alternativas com menores custos, mais eficientes e que porventura promovam a economia circular, principalmente dos países em desenvolvimento.

Para tal, tentou-se, ao longo desta dissertação, apresentar o estado atual sobre o tratamento de águas residuais através de uma análise bibliométrica para uma visão geral da literatura. A metodologia adotada, foi a de selecionar a amostra na *Web of Science* e restringir os parâmetros de pesquisa com o intuito de retirar o material irrelevante. Aplicando vários critérios, obteve-se as amostras finais sobre o tema do tratamento de águas residuais e sobre os temas adicionais do tratamento por cloração e por ultravioleta.

Com as amostras recolhidas, foi possível analisar graficamente e descritivamente a evolução anual, os tipos de publicação, as áreas de estudo e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável onde se inserem, os países e as instituições originárias, as palavras-chave, as citações e os autores, além das principais revistas onde foram publicados os documentos sobre o tema principal do tratamento de águas residuais. Também se procedeu à análise adicional sobre o tema do tratamento por cloração e por ultravioleta, destinado à reutilização, analisando a evolução anual das publicações e os países de onde advêm, além das palavras-chave e da colaboração internacional.

A revisão da literatura tomou a forma de uma visão geral da literatura, incidindo sobre os tópicos da absorção, eletrocoagulação, floculação e hidrodecloração, relativamente ao tratamento de águas residuais e sobre os temas adicionais do tratamento por cloração e por ultravioleta. Nesse capítulo apresentam-se os artigos de forma narrativa, identificando as suas características principais.

Por fim, apresentam-se as conclusões do trabalho, constatando um aumento do interesse da comunidade académica nos temas analisados, sendo a China o país mais prolífero em número de publicações. Comprovou-se que o sentido da pesquisa se orienta na adaptação dos recursos disponíveis na natureza, na sua forma original ou como resíduos da ação humana, às tecnologias já existentes, além do desenvolvimento de novas tecnologias que garantam a qualidade da água, a saúde pública e o meio ambiente, e da transposição dos estudos laboratoriais para a sua aplicação na realidade. Como desenvolvimentos futuros identificam-se estudos na temática analisada.

Palavras-Chave: Águas Residuais; Análise Bibliométrica; Desinfecção da Água; Drenagem; Tratamento de Águas Residuais; Visão Geral da Literatura.



## **ABSTRACT**

Access to potable water and wastewater sanitation remains limited or nonexistent for millions of people. A large percentage of wastewater returns to nature without adequate treatment and without the necessary reuse. Industrial effluents are increasingly characterized by recalcitrant contaminants with a higher degree of complexity, making their removal difficult. This demands investment from the academic community, companies, and governments in wastewater treatment technologies or alternatives with lower costs, higher efficiency, and the potential to promote a circular economy, especially in developing countries.

To this end, this dissertation aimed to present the current state of wastewater treatment through a bibliometric analysis and a literature overview. The adopted methodology was selecting the sample from the Web of Science and restricting the research parameters in order to remove irrelevant material. By applying various criteria, the final samples were obtained on the topic of wastewater treatment and on the additional topics of chlorination and ultraviolet treatment.

The collected samples allowed for a graphical and descriptive analysis of the annual evolution, publication types, areas of study, and the Sustainable Development Goals in which they are included, as well as the countries and institutions of origin, keywords, citations, authors, and the main journals where documents on the main topic of wastewater treatment were published. An additional analysis was also conducted on the topic of chlorination and ultraviolet treatment for reuse, analyzing the annual evolution of publications and the countries of origin, as well as keywords and international collaboration.

The literature review took the form of a literature overview, focusing on the topics of absorption, electrocoagulation, flocculation, and hydrodechlorination, in relation to wastewater treatment, and on the additional topics of chlorination and ultraviolet treatment. That chapter presents the articles, in a narrative way, identifying their main characteristics.

Finally, the conclusions of the work are presented, revealing an increased interest of the academic community in the analyzed topics, with China being the most prolific country in publications. It has been proven that the research focus evolves towards adapting the resources available in nature, in their original form or as residues of human action, to existing technologies, as well as developing new technologies that guarantee water quality, public health, and environmental protection, and moving beyond laboratory studies to real-world application. Possible future developments are proposed identifying studies on the analyzed topic.

**Keywords:** Sewage Wastewaters; Bibliometric Analysis; Water Disinfection; Drainage; Wastewater Treatment; Literature Overview.



## ÍNDICE DE MATÉRIAS

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....                | 1  |
| 1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO.....          | 2  |
| 1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....          | 5  |
| 1.3. ESTRUTURA.....                        | 6  |
| CAPÍTULO 2: METODOLOGIA.....               | 7  |
| 2.1 RECOLHA DE DADOS.....                  | 8  |
| 2.1.1 Base de dados.....                   | 8  |
| 2.1.2 Parâmetros de pesquisa.....          | 8  |
| 2.1.3 Tipos de documentos.....             | 10 |
| 2.1.4 Seleção das amostras.....            | 10 |
| 2.1.5 Armazenamento de documentos.....     | 13 |
| 2.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....             | 14 |
| 2.3 REVISÃO DA LITERATURA.....             | 18 |
| CAPÍTULO 3: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....     | 21 |
| 3.1 INTRODUÇÃO.....                        | 22 |
| 3.2 EVOLUÇÃO ANUAL DE PUBLICAÇÕES.....     | 22 |
| 3.3 TIPOS DE PUBLICAÇÃO.....               | 23 |
| 3.4 PALAVRAS-CHAVE.....                    | 25 |
| 3.4.1 Principais palavras-chave.....       | 26 |
| 3.4.2 Co-ocorrência de palavras-chave..... | 27 |
| 3.5 ÁREAS DE ESTUDO.....                   | 28 |
| 3.6 PAÍSES DAS PUBLICAÇÕES.....            | 29 |
| 3.6.1 Idiomas das publicações.....         | 31 |
| 3.6.2 Colaboração Internacional.....       | 32 |
| 3.7 CITAÇÕES.....                          | 33 |
| 3.7.1 Artigos com mais citações.....       | 33 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.7.2 Média anual de citações.....                  | 35        |
| 3.7.3 Citações por ano .....                        | 35        |
| 3.8 AUTORES.....                                    | 36        |
| 3.8.1 Autores com mais publicações .....            | 36        |
| 3.8.2 Autores mais citados.....                     | 37        |
| 3.8.3 Co-autoria .....                              | 38        |
| 3.9 PRINCÍPIAIS INSTITUIÇÕES .....                  | 39        |
| 3.10 PRINCÍPIAIS REVISTAS .....                     | 42        |
| 3.11 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL ..... | 48        |
| 3.12 ANÁLISE ADICIONAL .....                        | 49        |
| 3.12.1 Evolução anual publicações.....              | 50        |
| 3.12.2 Principais países .....                      | 51        |
| 3.12.3 Co-ocorrência de palavras-chave.....         | 55        |
| 3.12.4 Colaboração internacional .....              | 57        |
| 3.13 COMPÊNDIO DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA .....       | 59        |
| <b>CAPÍTULO 4: REVISÃO DA LITERATURA.....</b>       | <b>61</b> |
| 4.1 INTRODUÇÃO.....                                 | 62        |
| 4.2 ABSORÇÃO .....                                  | 65        |
| 4.2.1 Tratamento de águas residuais.....            | 65        |
| 4.2.2 Nanomateriais.....                            | 67        |
| 4.2.3 Bioabsorventes naturais.....                  | 69        |
| 4.2.4 Bioabsorventes minerais.....                  | 73        |
| 4.2.5 Absorventes de grafeno e carbono.....         | 75        |
| 4.2.6 Reutilização de resíduos .....                | 75        |
| 4.3 ELETROCOAGULAÇÃO.....                           | 76        |
| 4.3.1 Tratamento de águas residuais.....            | 76        |
| 4.3.2 Processos combinados .....                    | 79        |
| 4.3.3 Processos de oxidação avançada .....          | 80        |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3.4 Tratamento de efluentes de indústrias ..... | 86  |
| 4.3.5 Reutilização de resíduos .....              | 89  |
| 4.4 FLOCULAÇÃO .....                              | 89  |
| 4.4.1 Tratamento de águas residuais .....         | 89  |
| 4.4.2 Coagulantes naturais .....                  | 90  |
| 4.4.3 Coagulantes orgânicos.....                  | 91  |
| 4.4.4 Coagulantes inorgânicos .....               | 91  |
| 4.4.5 Biofloculantes.....                         | 92  |
| 4.4.6 Tratamento de efluentes de indústrias ..... | 94  |
| 4.4.7 Reutilização de resíduos.....               | 95  |
| 4.5 HIDRODECLORAÇÃO .....                         | 95  |
| 4.6 ANÁLISE ADICIONAL.....                        | 97  |
| 4.6.1 Cloração .....                              | 97  |
| 4.6.2 Ultravioleta.....                           | 98  |
| 4.6.3 Cloração/Ultravioleta .....                 | 101 |
| 4.7 COMPÊNDIO DA REVISÃO DA LITERATURA .....      | 102 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES .....                      | 105 |
| 5.1 INTRODUÇÃO .....                              | 106 |
| 5.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA .....                   | 106 |
| 5.3 VISÃO GERAL DA LITERATURA .....               | 108 |
| 5.4 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....                | 110 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                  | 111 |
| ANEXOS .....                                      | 137 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Sistema de drenagem do Palácio de Cnossos .....   | 2  |
| Figura 2 - Sistema de drenagem do Palácio de Cnossos: Canais de pedra.....                                 | 2  |
| Figura 3 - Cloaca Máxima.....  | 3  |
| Figura 4 - ETAR de Gaula: Tanque de arejamento.....  | 4  |
| Figura 5 - ETAR de Gaula: Decantador secundário.....   | 4  |
| Figura 6 - Metodologia utilizada.....  | 6  |
| Figura 7 - Estrutura da <i>Web of Science</i> .....  | 9  |
| Figura 8 - Esquema seleção da amostra tópico tratamento de águas residuais .....                           | 12 |
| Figura 9 - Esquema seleção da amostra tópico tratamento de águas residuais destinadas à reutilização ..... | 13 |
| Figura 10 - Índices da Coleção Principal da <i>Web of Science</i> .....                                    | 16 |
| Figura 11 - Interpretação JCI .....  | 18 |
| Figura 12 - Tópicos de Citação da <i>Web of Science</i> .....  | 19 |
| Figura 13 - Publicações por ano.....   | 23 |
| Figura 14 - Tipos de publicação.....   | 25 |
| Figura 15 - Ocorrência e força total da ligação das palavras-chave.....                                    | 26 |
| Figura 16 - Rede de co-ocorrência de palavras-chave.....   | 27 |
| Figura 17 - Áreas de estudo.....   | 28 |
| Figura 18 - Países das publicações .....   | 30 |
| Figura 19 - 25 países com mais publicações .....   | 30 |
| Figura 20 - Publicações de Portugal.....   | 31 |
| Figura 21 - Idiomas das publicações .....  | 31 |
| Figura 22 - Colaboração internacional .....  | 32 |
| Figura 23 - Artigos com mais de 200 citações .....   | 34 |
| Figura 24 - Média de citações por artigo.....  | 35 |
| Figura 25 - Número de citações por ano .....   | 36 |
| Figura 26 - Autores com mais de 3 artigos publicados .....   | 37 |
| Figura 27 - Autores mais citados.....  | 38 |
| Figura 28 - Rede de co-autoria de autores.....   | 39 |
| Figura 29 - Principais instituições.....   | 40 |
| Figura 30 - Países das instituições.....   | 41 |
| Figura 31 - Publicações da Universidade da Madeira.....  | 42 |
| Figura 32 - Índices da <i>Web of Science</i> .....   | 42 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 33 - Índices de revistas na <i>Web of Science</i> .....  | 43  |
| Figura 34 - Evolução do JCI para a revista <i>Water Science and Technology</i> .....                          | 46  |
| Figura 35 - Evolução do JCI para a revista <i>Water Research</i> .....  | 47  |
| Figura 36 - Evolução do JCI para a revista <i>Science of The Total Environment</i> .....                      | 47  |
| Figura 37 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....   | 49  |
| Figura 38 - Publicações por ano .....   | 50  |
| Figura 39 - Países das publicações sobre o tema cloração .....  | 52  |
| Figura 40 - Países com mais de 10 publicações sobre o tema cloração.....                                      | 52  |
| Figura 41 - Países das publicações sobre o tema ultravioleta.....   | 53  |
| Figura 42 - Países com mais de 100 publicações sobre o tema ultravioleta.....                                 | 53  |
| Figura 43 - Países com mais publicações sobre os temas tratamento por cloração e por ultravioleta...          | 54  |
| Figura 44 - Publicações de Portugal .....   | 55  |
| Figura 45 - Cloração: Co-ocorrência de palavras-chave .....   | 56  |
| Figura 46 - Ultravioleta: Co-ocorrência de palavras-chave.....  | 57  |
| Figura 47 - Cloração: Colaboração internacional.....  | 58  |
| Figura 48 - Ultravioleta: Colaboração internacional .....   | 59  |
| Figura 49 - Classificação das tecnologias disponíveis para a remoção de poluentes e exemplo de técnicas ..... | 66  |
| Figura 50 - Diagrama esquemático dos processos envolvidos em POA .....  | 82  |
| Figura 51 - Mecanismo de floculação utilizando floculantes à base de plantas .....                            | 94  |
| Figura 52 - Síntese das partículas de "ferro verde" .....   | 96  |
| Figura 53 - Provável ecotoxicidade causada pelo Covid-19 .....  | 100 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Representação quartis .....                        | 17  |
| Tabela 2 - Artigos com mais de 200 citações (Parte 1).....    | 33  |
| Tabela 3 - Artigos com mais de 200 citações (Parte 2).....    | 34  |
| Tabela 4 - Indicadores das principais revistas.....           | 45  |
| Tabela 5 - Número de documentos por tópico e amostra.....     | 62  |
| Tabela 6 - Documentos por tópico (Parte 1) .....              | 63  |
| Tabela 7 - Documentos por tópico (Parte 2) .....              | 64  |
| Tabela 8 - Documentos por tópico (Parte 3) .....              | 65  |
| Tabela 9 - Documentos dos temas Cloração e Ultravioleta ..... | 97  |
| Tabela 10 - Tabela Síntese (Parte 1) .....                    | 102 |
| Tabela 11 - Tabela Síntese (Parte 2) .....                    | 103 |



## SIGLAS

ACS – Carvão Aluminossilicato Ativado  
AHCI – *Arts & Humanities Citation Index*  
ATP – Trifosfato de Adenosina  
BGCV – Biomassa Granular de Cinzas Volantes  
BioMnOx – Óxidos de Manganês Biogénicos  
BKCI – *Book Citation Index*  
CCRE – *Current Chemical Reactions Expanded*  
CH – Cavitação Hidrodinâmica  
CIP – Ciprofloxacina  
CNCI – *Category Normalized Citation Impact*  
CPCI-S – *Conference Proceedings Citation Index-Science*  
Cr (VI) – Crómio Hexavalente  
CWPO – Oxidação Húmida Catalítica com Peróxido  
DBP – Subprodutos de Desinfecção  
DDNP – diazodinitrofenol  
DMC – *2-methacryloyloxyethyl trimethyl ammonium chloride*  
EC – Eletrocoagulação  
EO – Eletro-oxidação  
EPS – Substâncias Poliméricas Extracelulares Microbianas  
ESCI – *Emerging Sources Citation Index*  
ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais  
Fe-C/PS – Persulfato Ativado com Microeletrólise de Ferro-Carbono  
IA – Inteligência Artificial  
IC – *Index Chemicus*  
JCI – *Journal Citations Indicator*  
JCR – *Journal Citation Reports*  
JIF – *Journal Impact Fator*  
MBR – Biorreator de Membrana  
MBBR – Reator Biológico de Leito Móvel  
nZVI – Nanopartículas de Ferro Zero Valente  
PAA – Ácido Peracético  
PAC – Cloreto de Polialumínio  
PEOA – Processos Eletroquímicos de Oxidação Avançada

POA – Processos de Oxidação Avançada  
PST – Sal de Titânio e Polissilicato  
PVA – Álcool polivinílico  
SALSA – Search, Appraisal, Synthesis and Analysis  
SBR – Reator Biológico de Leito Sequencial  
SCIE – *Science Citation Index Expanded*  
SOB – Substâncias Biobaseadas Solúveis em Água  
SSCI – *Social Sciences Citation Index*  
UV – Ultravioleta  
ZVI – Ferro Zero Valente

# CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A história do tratamento de águas residuais inicia-se nos primeiros anos do século XX com a instalação das primeiras Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), (Monte, 2016). No entanto e apesar de não serem consideradas infraestruturas essenciais ao crescimento dos meios urbanos, existem registos de obras de drenagem de águas residuais com mais de 5 000 anos, (Matos, 2003).

Matos (2003), apoiado em Webster (1962), aponta a drenagem das vias do aglomerado de Mohengo-Doro, em 3 000 A.C. Com referência a Maner (1996), o mesmo autor refere as infraestruturas de drenagem e saneamento das cidades de Ur e Babilónia, nomeadamente sarjetas e sumidouros, para encaminhamento das águas aos coletores, em 2 500 A.C.

Nas ruínas do palácio de Cnossos, construído antes de 1 000 A.C. é possível ainda hoje visitar o seu complexo sistema de drenagem, com canais de pedra e tubos de barro enterrados que descarregavam o efluente, águas pluviais e de excreta, a considerável distância. A autolimpeza do sistema era garantida pela precipitação frequente e intensa na região, (Matos, 2003; Cartwright, 2012).



Figura 1 - Sistema de drenagem do Palácio de Cnossos

Fonte: Apaixonados por História, 2019



Figura 2 - Sistema de drenagem do Palácio de Cnossos: Canais de pedra  
Fonte: Apaixonados por História, 2019

Matos (2003) baseado em Hodge (1992), aponta o primeiro sistema separativo em Jerusalém, em 1 000 A.C. e na cidade de Marzobotto, uma das cidades da Itália Central, a civilização etrusca construiu um evoluído sistema de drenagem, em 600 A.C.

Os esgotos de Roma, são chamados por Plínio como o maior "*noteworthy achievement of all*". A *Cloaca Máxima*, construída em Roma, em 600 A.C., permitiu o encaminhamento das águas até ao Rio Tibre, possibilitando o processo de desenvolvimento da urbanização. Inicialmente, o sistema era composto essencialmente por canais abertos, drenando as águas pluviais e de esgotos, sendo

sucessivamente tapado, estando atualmente totalmente enterrado. A sua sucessiva manutenção permitiu o seu atual funcionamento, na função de drenagem das águas pluviais da cidade.

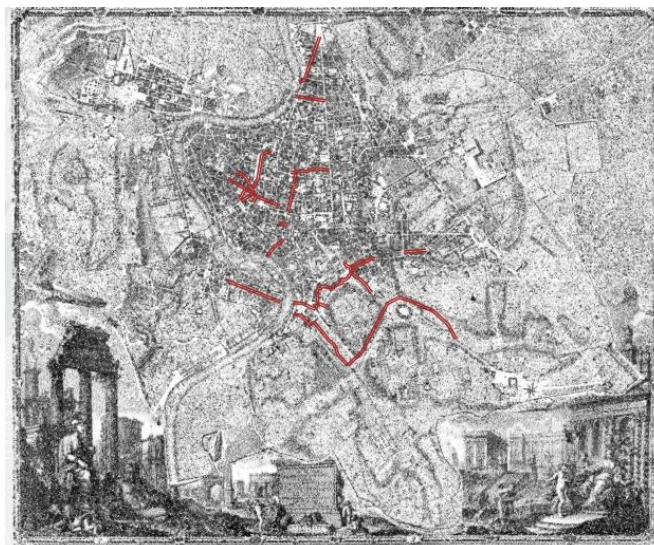


Figura 3 - Cloaca Máxima

Fonte: *Aquae Urbis Romae: the Waters of the City of Rome*

Na civilização chinesa identificam-se também sistemas de drenagem de águas residuais, inclusive um sistema enterrado, em 200 D.C. (Needham *et al.*, 1971) e os “canais de limpeza” de Angkor depois do século VI, (Matos, 2003).

Desde o Império Romano até ao Século XVII, não se denotam evoluções nos métodos de drenagem e saneamento na Europa, podendo até considerar-se um retrocesso na Idade Média.

Em 1370, em Paris, é executado o primeiro coletor enterrado, a fossa de St. Opportune, descarregando no rio Sena, mantendo-se, no entanto, a drenagem de grandes áreas desta cidade em “valas abertas de esgoto” até ao século XVIII. Em Londres, o primeiro coletor enterrado foi planeado no início do século XVII, (Matos, 2003).

Em meados do século XIX, tendo-se conhecido a relevância da autolimpeza e do declive, desenvolvem-se em Paris equipamentos de limpeza e de descarga automática, de forma a diminuir encargos com a manutenção das redes públicas. Define-se em Londres, na década de 1840, o critério de velocidade mínima de 0,6 a 0,9 m/s (Metcalf & Eddy, 1928). No final desse século começam a utilizar-se coletores de betão, com secção circular, com autolimpeza e sem juntas transversais, (Matos, 2003).

Às datas de 1842 em Hamburgo, 1852 em Londres, 1858 em Chicago e 1870 em Brooklyn, projetam-se os primeiros sistemas de drenagem do tipo unitário. O primeiro sistema separativo é projetado entre 1870 e 1880, nas cidades Lenox e Memphis, nos Estados Unidos da América, (Matos, 2003).

Na viragem do século XIX para XX, já eram habituais os tratamentos de águas residuais por aplicação no solo e irrigação agrícola, filtração e precipitação química, (Matos, 2003).

## Capítulo I

Em 1892, nos Estados Unidos da América, 21 cidades eram servidas por tratamento de aplicação no solo e 6 por precipitação química. Em Paris, desde o século XIX que o efluente é encaminhado para tratamento no solo, em Achères. As melhorias nesta infraestrutura permitem atualmente tratamento por lamas ativadas e tratamento físico-químico, (Matos, 2003).

Em Portugal, e com a reconstrução da cidade de Lisboa, após o terramoto de 1755, procedeu-se à reparação dos coletores existentes desde o século XV e à instalação de novos coletores que ainda hoje subsistem. No século XIX e pelo crescimento das cidades devido à Revolução Industrial, foi permitida a ligação das águas residuais domésticas às redes pluviais existentes. No início do século XX começam a utilizar-se coletores de betão, com juntas fechadas, garantindo a autolimpeza e estanqueidade, (Matos, 2003).

O primeiro sistema separativo doméstico em Portugal, construiu-se na cidade do Porto, mas em 1940-1950, muitas das grandes cidades já possuíam coletores pluviais e unitários, sendo que, entre 1950 e 1970 procedeu-se à remodelação e melhoria da grande parte dos sistemas unitários existentes e à execução de novas redes separativas, (Matos, 2003).

Sendo o tratamento de águas residuais identificado como uma necessidade premente, durante o século XX começaram a instalar-se ETAR nos sistemas existentes.

Com referência aos dados publicados pelo Instituto Nacional de Estatística, em 2020 existiam em Portugal Continental 2 832 ETAR, 19 na Região Autónoma da Madeira e 22 na Região Autónoma dos Açores, sendo 84% dos alojamentos existentes em Portugal Continental servidos por tratamento de águas residuais e 66,9% na Região Autónoma da Madeira, não existindo dados disponíveis para a Região Autónoma dos Açores, conforme tabelas constantes no Anexo.

Na Região Autónoma da Madeira, existem atualmente 2 municípios que dispõem de ETAR com tratamento terciário, designadamente a ETAR de Gaula no Município de Santa Cruz e a ETAR da Ponta no Município do Porto Santo.



Figura 4 - ETAR de Gaula: Tanque de arejamento  
Fonte: Elaboração própria



Figura 5 - ETAR de Gaula: Decantador secundário  
Fonte: Elaboração própria

## 1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo principal deste trabalho é a análise quantitativa e qualitativa da pesquisa global sobre o tratamento de águas residuais, de forma a definir o estado da arte sobre a pesquisa desenvolvida, a nível mundial, na área em estudo, colmatando a lacuna identificada na compilação das mais recentes tecnologias e recursos naturais aplicados ao tratamento de águas residuais.

Para atingir este objetivo identificam-se os seguintes objetivos específicos:

1. Analisar o período entre 1950 e 2024, o que renderá uma amostra de milhares de resultados, com seleção da amostra a realizar em data a definir.
2. Analisar as variáveis:
  - 2.1 Evolução anual de publicações;
  - 2.2 Tipos de publicação;
  - 2.3 Áreas de estudo;
  - 2.4 Principais países;
  - 2.5 Principais instituições;
  - 2.6 Principais publicações;
  - 2.7 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.
3. Será concebida uma secção para análise adicional para examinar as diferenças nas pesquisas científicas sobre tratamentos para água destinada à reutilização, designadamente ultravioleta (UV) e cloração, dados estes tratamentos serem, por várias razões económicas e ambientais, as opções mais utilizadas para desinfeção de água (Gómez-López, 2009).

Para o efeito recorre-se à bibliometria, “técnica quantitativa e estatística de medição dos índices de produção e disseminação do conhecimento científico” para uma “avaliação objetiva da produção científica”, (Araújo, 2006, p. 12).

A base de dados escolhida foi a *Web of Science*, por ser aquela a que a autora tem acesso livre e gratuito, através de protocolo da sua instituição, por indexar milhares de periódicos, com melhor cobertura nas áreas científicas, comparativamente à *Scopus*, (Costa *et al.*, 2012), por ser composta por informação desde 1900 até hodiernamente, para algumas revistas, com atualização semanal e sendo mais seletiva na cobertura de periódicos do que a *Scopus*, pode ser mais adequada para pesquisa numa área de estudo específica (Costa *et al.*, 2023).

Para obtenção da amostra será efetuada uma procura na *Web of Science Core Collection* com os termos “tratamento de águas residuais” na opção “tópico”, no período de 1950 a 2024.

Este procedimento assim como o de seleção da amostra será especificamente detalhado no capítulo 2 do presente trabalho.

Serão analisadas as variáveis: evolução, tipo de publicação, áreas de estudo, principais países, principais instituições, principais publicações e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, para o tratamento de águas residuais. Para os tratamentos destinados à reutilização, serão analisadas as variáveis: evolução e principais países de publicação. Posteriormente, será apresentada uma visão geral da literatura à amostra definida para o tópico tratamento de águas residuais.

De seguida, apresenta-se o esquema da metodologia utilizada.

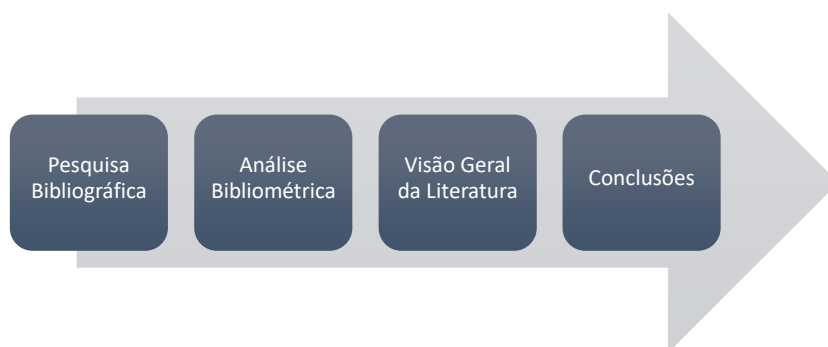


Figura 6 - Metodologia utilizada  
Fonte: Elaboração própria

### 1.3. ESTRUTURA

O presente trabalho, elaborado com o objetivo de conhecer o estado atual sobre o tratamento de águas residuais, permite a conclusão do 2.º ciclo de estudos, mestrado em Engenharia Civil e é composto de 5 capítulos, cuja síntese se apresenta de seguida:

- I. O primeiro capítulo é composto pela introdução, onde se apresenta um enquadramento histórico da drenagem e do tratamento de águas residuais, além de se definirem os objetivos, abordar a metodologia adotada e a estrutura do trabalho;
- II. No segundo capítulo é apresentada com detalhe a metodologia adotada na pesquisa bibliográfica e na seleção das amostras;
- III. No terceiro capítulo efetua-se a análise bibliométrica das amostras selecionadas, com recurso a ferramentas de processamento estatístico;
- IV. No quarto capítulo é apresentada uma visão geral da literatura sobre o tratamento de águas residuais além de ser desenvolvida uma análise adicional sobre as diferenças nas pesquisas científicas sobre os tratamentos para a água destinada à reutilização;
- V. No quinto capítulo apresentam-se as conclusões da dissertação;
- VI. Nos anexos apresentam-se informações extraídas de outras fontes.

## CAPÍTULO 2: METODOLOGIA

## 2.1 RECOLHA DE DADOS

O cerne de uma análise bibliométrica é simplesmente contar (Pendlebury, 2008), sendo esta uma atividade básica, que assimilada desde cedo, permite também desenvolver trabalhos tão elaborados como uma análise bibliométrica. Este estudo inicia-se com a recolha de dados, que posteriormente serão analisados. Todo este procedimento será apresentado de forma clara e detalhada, de forma a ser útil para o conhecimento do estado atual da pesquisa no tratamento de água residuais. “Esta transparência vai ajudar a assegurar o seu uso apropriado.”, (Pendlebury, 2008, tradução própria).

### 2.1.1 Base de dados

Conforme já referido, a base de dados escolhida para a realização deste trabalho foi a *Web of Science*. Apesar de já existirem outras bases de dados que também utilizam indicadores bibliométricos e viabilizam resultados de análise bibliométrica, a *Web of Science* “foi a principal ferramenta utilizada para a realização de análise de citações” (Costa *et al.*, 2012), durante longo tempo.

A *Web of Science* é composta por várias bases de dados, conforme se pode verificar na Figura 7. Para a realização deste trabalho acedeu-se à *Core Collection* ou Coleção Principal, em português. Esta base de dados contém mais de 21 000 revistas, 140 000 livros e 300 000 atas de conferências, sendo que os livros e atas de conferências são selecionados apenas com o critério de qualidade. Já as revistas devem cumprir com 28 critérios de qualidade e impacto para a sua inclusão na base de dados. Esta seleção é efetuada por especialistas que trabalham apenas para a *Clarivate*, a quem a publicação e ligação a editoriais está vedada, de forma a manter a integridade e neutralidade editorial. (Delgado, 2023-2024).

### 2.1.2 Parâmetros de pesquisa

Acedendo à base de dados, e para a amostra principal, pode pesquisar-se na opção Tópico, os termos “*wastewater treatment*”.

Apesar da Coleção Principal conter revistas nas línguas originais, a *Web of Science* contém sempre também a tradução em inglês, pelo que se deve efetuar a pesquisa neste idioma. Não é necessário utilizar o operador booleano AND quando pesquisada mais do que uma palavra, já que a base de dados o assume. Como se pretende pesquisar o termo exato, tratamento de águas residuais, em inglês *wastewater treatment*, coloca-se este termo entre aspas.

Ao efetuar a pesquisa na opção tópico, a base de dados procura os termos introduzidos em quatro campos: título do documento, resumo, palavras-chave do autor e *Keyword Plus*, que são palavras-chave adicionais criadas pela *Web of Science*, através dos títulos das referências bibliográficas. De referir que

antes de 1991, esta base de dados apenas indexava títulos, autores e referências citadas. Após esta data, começou a indexar também o resumo e as palavras-chave.

Dado o hiato temporal considerado decorrer entre os anos de 1950 até o ano corrente, adicionou-se à pesquisa o parâmetro Ano de publicação 1950-2024.

Com os parâmetros definidos, a pesquisa efetuada a 05 de junho de 2024 devolve 91 466 documentos.

Tentou-se outras combinações de palavras-chave tais como *sewage treatment* e *residual water*, tendo-se verificado que a pesquisa inicial era mais abrangente, pelo que, a mesma foi a adotada para prosseguir este estudo.

Verifica-se que existem documentos com data posterior à pesquisa. Isto ocorre porque são as revistas que decidem a data oficial da publicação, podendo os documentos já estarem disponíveis na página eletrónica da revista antes dessa data.



Figura 7 - Estrutura da *Web of Science*  
 Fonte: Delgado (2023-2024)

## Capítulo II

Para a amostra adicional, sobre a pesquisa já efetuada a 05 de junho com 91 466 resultados, aplicou-se o filtro com o termo “chlorination”, tendo-se obtido 742 resultados.

Repetindo o procedimento, mas substituindo o termo “chlorination” por “UV” OR “Ultraviolet”, obteve-se 5 742 resultados.

### 2.1.3 Tipos de documentos

Os 91 466 documentos dividem-se em vários tipos de documentos, tais como artigos, acesso antecipado, resumos da reunião, material editorial, correções, itens de notícias, retratação de publicação, notas, capítulos de livros, cartas, críticas literárias, entre outros.

### 2.1.4 Seleção das amostras

Considerando que a *Web of Science* indexa todo o conteúdo de uma revista, além dos artigos, revisões, atas de conferência, entre outros, inclui também cartas, material editorial, correções e demais conteúdos que podem integrar uma revista.

Para cumprir o objetivo proposto com este trabalho interessa analisar as publicações de investigações, pelo que se excluiu o material editorial, por poder conter opiniões pessoais, além de outros materiais que podem não acrescentar conteúdo ao tema.

Assim, para excluir este material da amostra principal, utilizou-se o filtro Tipos de Documentos e selecionou-se as opções Resumo da reunião, Material editorial, Item de notícias, Artigo de dados, Nota, Carta, Discussão, Crítica literária, Reimpressão, Bibliografia e Análise da base de dados, seguida da opção Excluir.

Após este procedimento a pesquisa diminui para 90 362 documentos.

Verificou-se também que a pesquisa inclui tipos de documentos identificados como Correção, Retratação de publicação, Retratação e *Publication with expression of Concern*. Estes documentos são também excluídos, por terem sido alterados pelo autor e/ou revista.

Após esta exclusão, a pesquisa recaí sobre 90 178 documentos, sobre os quais incidirá a análise bibliométrica incluída no capítulo 3. Adicionou-se estes documentos a Listas de itens marcados, considerando que, dado a base de dados está continuamente em atualização, a mesma pesquisa, efetuada em data posterior, já iria conter número diferente de documentos.

Atendendo a não ser viável efetuar a revisão da literatura a um número tão vasto de documentos, aplicou-se o filtro Categorias da *Web of Science*, elucidado em 2.2, aquando da abordagem à análise bibliométrica. Verificou-se que as categorias que identificam mais de 15 000 documentos são as categorias de Ciências Ambientais, Engenharia Ambiental, Recursos Hídricos e Engenharia Química,

detento todas as outras menos de 7 500 documentos cada. Assim, refinou-se a pesquisa apenas para estas categorias principais, ficando com 60 196 documentos.

Utilizando o filtro Tópicos de Citação Meso, bem definido em 2.3, aquando da abordagem à revisão da literatura, verifica-se que o tópico Bioengenharia conta com 18 551 documentos. No entanto o segundo tópico com mais documentos, Tratamento da Água, parece enquadrar-se melhor na presente análise, pelo que, aplicando-o, a amostra é reduzida para 11 137 documentos, dos tipos Artigo, Artigo de revisão, Artigo de conferência e Acesso antecipado.

Considerando que os documentos estavam ordenados por relevância, categoria definida na *Web of Science*, optou-se por seleccionar os 2 000 documentos mais relevantes e guardá-los numa lista.

A *Web of Science* permite aceder à informação essencial de todos os documentos indexados, tais como título, os autores e suas afiliações, o resumo em inglês, as palavras-chaves do autor, a data de publicação e indexação e o tipo de documento, entre outros. No entanto, apenas permite o acesso ao texto integral dos documentos que estão em acesso aberto, neste caso a 428 documentos da lista guardada.

Considerando que a leitura dos documentos é fundamental para a revisão da literatura a efetuar posteriormente, reduz-se assim a amostra a estes documentos.

Acedendo ao Relatório de Citações da *Web of Science*, é possível visualizar e analisar o número de citações dos documentos. Assim, ao considerar os artigos que detêm 5 ou mais citações, obtém-se a amostra final de 272 documentos, referentes ao tratamento de águas residuais.

Pode observar-se na Figura 8 o esquema representativo da seleção da amostra sobre o tratamento de águas residuais.

Para a amostra adicional, sobre a pesquisa já efetuada a 05 de junho com 90 178 resultados, para a amostra principal, que à data de 13 de junho conta com 90 529 documentos, aplicou-se o filtro com o termo “chlorination”, tendo-se obtido 737 resultados.

Repetindo o procedimento, mas substituindo o termo “chlorination” por “UV” OR “Ultraviolet”, obteve-se 5 724 resultados.

Refere-se que ao efetuar esta pesquisa, sobre a pesquisa já efetuada a 05 de junho, mantêm-se os tipos documentos excluídos na pesquisa inicial, por não serem relevantes para o estudo em curso.

Replicando os filtros aplicados à amostra principal, para a amostra sobre o tema do tratamento por cloração, os números reduzem-se para 621 após o filtro Categorias da *Web of Science*, 215 após filtro Tópicos de Citação Meso, 36 para o filtro Acesso aberto e obtendo-se finalmente 24 documentos com mais de 5 citações.

Repetindo para a amostra sobre o tratamento por ultravioleta, retém-se 3 487 após o filtro Categorias da *Web of Science*, 1 168 após filtro Tópicos de Citação Meso, 246 para o filtro Acesso aberto e restando finalmente 178 documentos com mais de 5 citações.

A Figura 9 apresenta o esquema da seleção das amostras sobre os tópicos do tratamento por cloração e por ultravioleta.

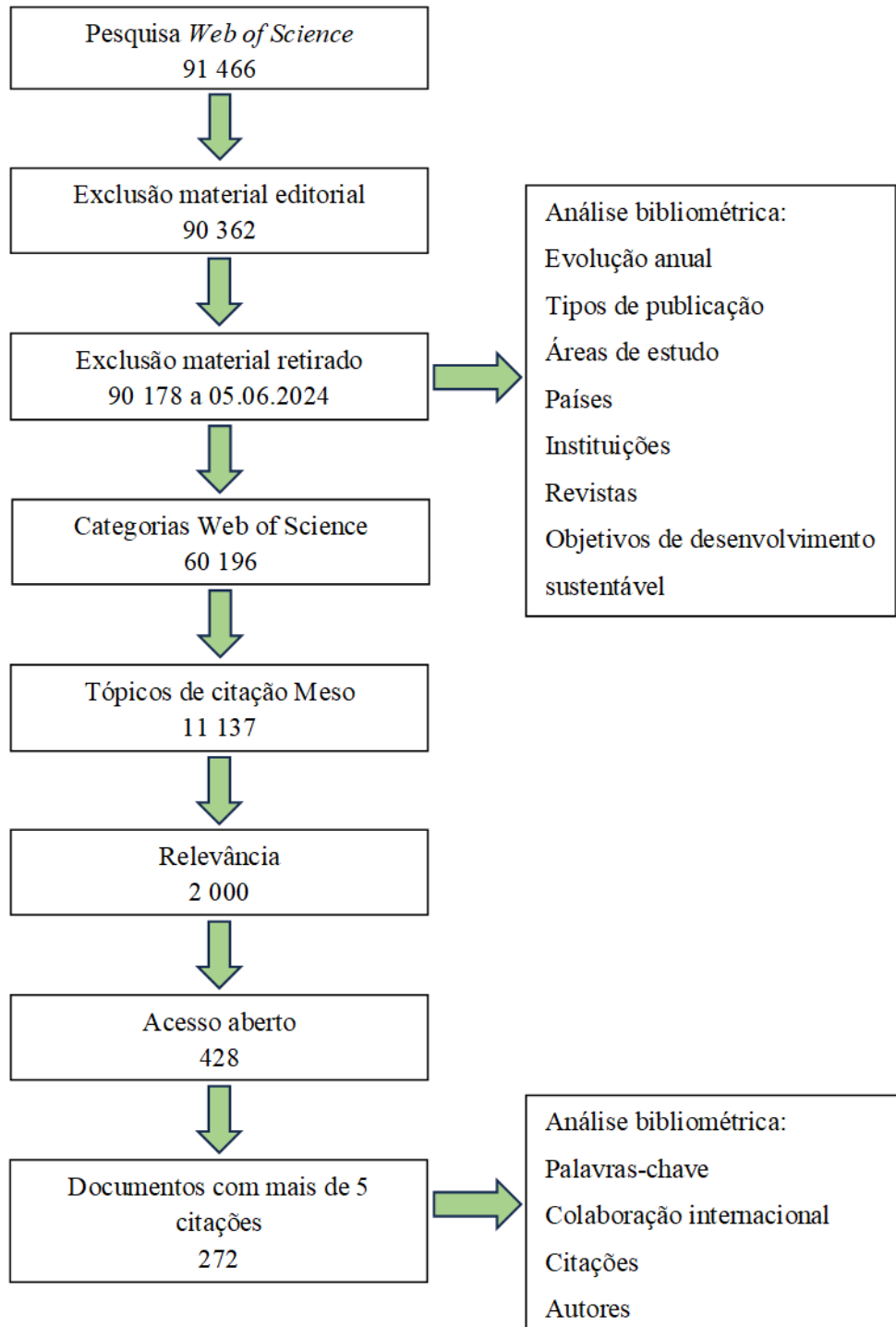


Figura 8 - Esquema seleção da amostra tópico tratamento de águas residuais  
Fonte: Elaboração própria

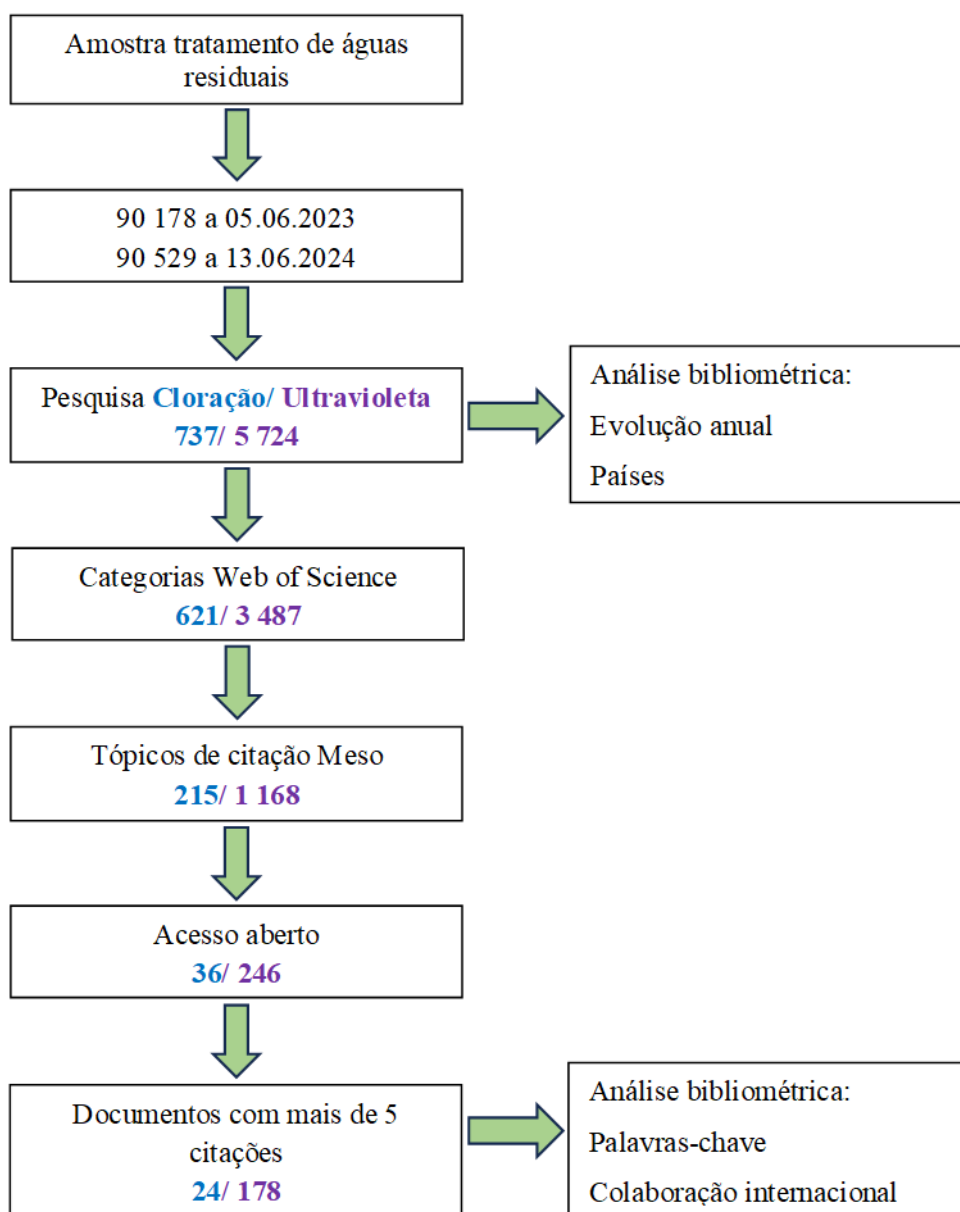


Figura 9 - Esquema seleção da amostra tópico tratamento de águas residuais destinadas à reutilização  
 Fonte: Elaboração própria

A observação destes documentos será abordada nos capítulos 3 e 4, após análise da amostra sobre tratamento de águas residuais, com o intuito de identificar as diferenças nas pesquisas científicas sobre os tratamentos para a água destinada à reutilização.

### 2.1.5 Armazenamento de documentos

A *Web of Science* disponibiliza um software de gestão de biblioteca para cada utilizador, o *EndNote*, na versão online ou desktop, sendo possível salvar automaticamente os documentos, para a

pasta [*Unfiled*]. As referências devem depois ser organizadas em grupos, de forma que a pasta [*Unfiled*] fique vazia para futuras importações. É possível adicionar também outras referências à biblioteca, estando também disponível a opção de identificação de referências duplicadas que podem ser apagadas.

De referir que a pesquisa no *EndNote* difere da pesquisa na *Web of Science*. A pesquisa de duas palavras é assumida com o operador booleano OR, sendo que para o operador AND deve colocar-se o operador + entre as palavras e para o operador booleano NOT, o operador -. A pesquisa de termos exatos é semelhante nas duas plataformas, com os termos inscritos entre aspas.

É possível também extrair diversa informação dos documentos em formato Microsoft Excel e Microsoft Word tais como a lista de referências bibliográficas, no estilo em utilização.

### 2.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A avaliação da qualidade e quantidade de publicações pode ser feita utilizando um conjunto de índices matemáticos e estatísticos chamados indicadores bibliométricos. Estes indicadores podem ser classificados em 3 tipos: Os indicadores quantitativos, que medem a produtividade de um investigador, os indicadores de desempenho, que avaliam a qualidade das publicações e os indicadores estruturais que ajudam a estabelecer ligações entre publicações, autores e campos de pesquisa. Estes indicadores são importantes tanto para os investigadores como para revistas e organizações porque permitem comparar o seu desempenho (Joshi, 2015).

A atenção neste trabalho recai sobre os indicadores bibliométricos quantitativos e qualitativos. Assim a análise quantitativa dos documentos extraídos, para o tema principal do tratamento de águas residuais, incide sobre os seguintes filtros, para a amostra de 90 178 documentos:

Evolução - Anos de publicação;

Tipos de Publicação – Tipos de documentos;

Área de estudo – Áreas de pesquisa;

Principais países – Países/Regiões;

Principais instituições – Afiliação e

Objetivos de desenvolvimento sustentável, filtro com o mesmo nome.

O tratamento desta informação é feito com recurso ao Microsoft Excel, ferramenta de extremo valor para análise e representação de dados, de forma gráfica.

Não sendo exequível a análise de palavras-chave, colaboração internacional, citações e autores para esta amostra de 90 178 documentos, optou-se por efetuar a análise bibliométrica destes parâmetros para a amostra de 272 artigos, a utilizar também na revisão da literatura.

Assim, na *Web of Science*, utilizando a opção Exportar seguida de Arquivo de texto sem formatação, selecionando todos os 272 registos e opção gravar conteúdo de Registo completo e

referências citadas, extraindo um ficheiro de texto que permitirá a criação de redes no programa *VOSviewer*.

Este software, desenvolvido pelo *Centre for Science and Technology* da Universidade de Leiden no Países Baixos, permite a construção e visualização de rede bibliométricas, de revistas, investigadores e artigos publicados construídas com base em citações, co-citações ou relações de co-autoria. (Leiden University, 2024).

Neste programa, os mapas são criados para um tipo de item. Será utilizado neste estudo os itens palavras-chave, países, citações e autores. Entre cada par de itens existe um tipo de ligação que os relaciona. Será aplicado neste trabalho as ligações de co-ocorrência, para as palavras-chave, de co-autoria para os países e de citação e co-autoria para autores. Entre cada par de itens pode existir mais do que uma ligação, sendo que a força de ligação de cada item tem um valor numérico positivo associado. A ligação será mais forte quanto maior for esse valor numérico. A força de ligação poderá indicar, por exemplo, o número de publicações em que duas palavras-chave ocorrem juntas, para as redes de co-ocorrência. Assim, as redes no *VOSviewer* são construídas por itens e as suas ligações, sendo que os itens podem ser agrupados em conjuntos. Então, visualmente, quanto maior o nó atribuído a um item, mais vezes o mesmo se verifica na análise efetuada e quanto mais espessa a ligação entre nós, maior será o seu aparecimento conjunto no estudo (van Eck e Waltman, 2023).

A análise qualitativa versa sobre as principais publicações.

Na bibliometria, a análise de citações permite identificar e descrever “padrões na produção do conhecimento científico”, entre eles o fator de impacto, (Araújo, 2006). A *Web of Science* indexa além do documento, as referências citadas pelo autor, as citações recebidas e também documentos relacionados, por terem grande número de referências em comum com o documento em análise, (Delgado, 2023-2024).

Conforme se observa na Figura 10, as revistas da Coleção Principal, ao entrar na *Web of Science* e ao longo de todo o seu tempo de publicação, são incluídas em três índices primários: SCIE – *Science Citation Index Expanded*, índice de ciências, SSCI – *Social Sciences Citation Index*, índice de ciências sociais e AHCI – *Arts & Humanities Citation Index*, índice de artes e humanidades, quando cumprem com os 24 critérios de qualidade e 4 de impacto. As revistas que apenas cumprem com os critérios de qualidade são incluídas no índice ESCI – *Emerging Sources Citation Index*, um índice multidisciplinar.

Todas as revistas incluídas nestes índices têm um perfil no JCR – *Journal Citation Reports* e um JIF – *Journal Impact Fator*, fator de impacto. O JCR é uma base de dados, atualizada anualmente, no final de junho. O JCR disponível atualmente é JCR 2023, com métricas de 2022, (Delgado, 2023-2024).

O fator de impacto de uma revista no ano X é calculado pelo quociente entre as citações no ano X, para os itens publicados nos anos X-2 e X-1, pelo número de itens citáveis nos anos X-2 e X-1. Refere-se que no numerador se incluem todos os tipos de documentos na Coleção Principal, sendo que

o denominador constituído pelo número de itens citáveis, ou seja, artigos e revisões publicados, por ano. Ou seja, o JIF de uma revista no ano 2022, incluído no JCR 2023, é calculado de acordo com a equação 1, adaptada de Delgado, 2023-2024:

$$JIF \text{ de } 2022 = \frac{\text{Citações em 2022 para itens publicados em 2020 + 2021}}{\text{Número de itens citáveis em 2020 + 2021}} \quad (1)$$

Assim, o cálculo do fator de impacto de uma revista é uma média das citações recebidas pelo número de artigos, não se aplicando a artigos nem a autores, nem podendo ser utilizado para comparar revistas de área de pesquisa diferentes. Para isso, utilizam-se métricas normalizadas como os percentis, os quartis ou o JCI – *Journal Citations Indicator*, (Delgado, 2023-2024).

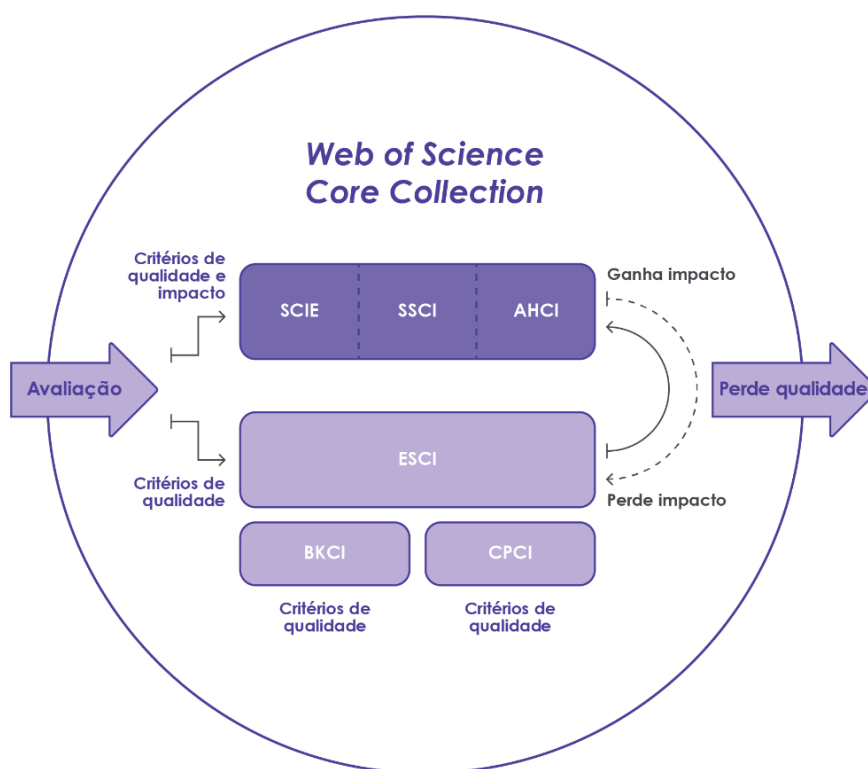


Figura 10 - Índices da Coleção Principal da *Web of Science*  
 Fonte: Adaptado de Delgado (2023-2024)

Na *Web of Science*, após a inclusão num dos índices referidos, as revistas são classificadas em categorias, existindo atualmente 254. Cada revista é identificada com pelo menos uma categoria, podendo pertencer a mais do que uma ou estar na categoria multidisciplinar. (Delgado, 2023-2024).

O percentil é uma métrica normalizada que permite comparar revistas da mesma categoria. Sendo o seu valor máximo 100 é possível perceber facilmente onde se situa o fator de impacto de uma revista na sua categoria.

O quartil é também uma métrica normalizada, obtida pela divisão da categoria em 4 partes iguais. Calcula-se dividindo a posição do fator de impacto da revista na categoria, pelo número de revistas na categoria. Assim, as revistas com o fator de impacto mais alto ficam situadas no Q1 e as com fator de impacto mais baixo no Q4, conforme se verifica na Tabela 1.

Tabela 1 - Representação quartis

| Quartil | Intervalo           | Observações                                 |
|---------|---------------------|---|
| Q1      | $0.0 < Z \leq 0.25$ | Jornais com melhor reputação numa categoria |
| Q2      | $0.25 < Z \leq 0.5$ |   |
| Q3      | $0.5 < Z \leq 0.75$ |   |
| Q4      | $0.75 < Z$          | Jornais com pior reputação numa categoria   |

Fonte: Adaptado de Delgado (2023-2024)

Não sendo comum, é possível uma revista estar identificada em 2 categorias, detendo assim percentis e quartis diferentes.

O indicador mais recente da *Web of Science* é o já referido JCI, sendo também uma métrica normalizada. As citações esperadas são a média de citações de documentos do mesmo tipo, ano e categoria. Recorrendo ao CNCI - *Category Normalized Citation Impact*, calculado pelo quociente entre as citações reais e as citações esperadas, obtém-se o JCI que é o CNCI médio de todos os artigos e revisões publicados nos 3 anos anteriores. Sendo o  $JCI = 1$  a média, é um indicador mais claro de interpretar já que permite perceber que para JCI maiores ou menores que 1, o documento recebeu mais ou menos citações do que o esperado, respetivamente.

Dado que o JIF tem intervalos de valores muito variáveis, o JCI é mais simples de interpretar, sendo que também é possível calcular os percentis e quartis associados ao JCI de uma revista.

O JCI tem também a vantagem de, sendo normalizado e com a média de 1 em todas as categorias, possibilita assim a sua utilização para comparação de revistas de categorias diferentes o que não é possível com o JIF. Na Figura 11 observa-se uma representação gráfica deste indicador.

Estes são os indicadores a aplicar, no capítulo seguinte, à amostra seleccionada para o tema do tratamento de águas residuais.

Para a análise adicional, sobre os tratamentos destinados à reutilização, nomeadamente a cloração e por ultravioleta, será analisada, por tipo de tratamento, a evolução anual e principais países das publicações, para as amostras de 737 e 5 724 documentos, sendo também apresentada uma rede de co-ocorrência de palavras-chave e de colaboração entre países para as amostras de 24 e 178 documentos, respetivamente.

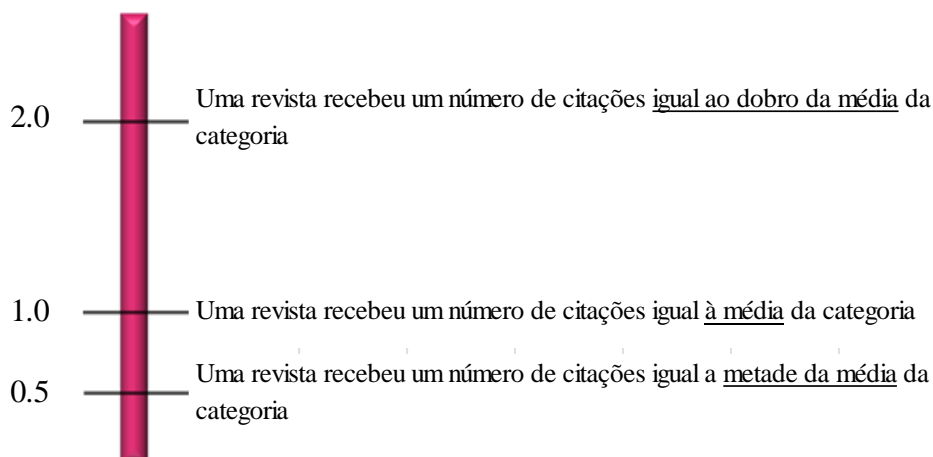


Figura 11 - Interpretação JCI  
Fonte: Adaptado de Delgado (2023-2024)

Considerando que a *Web of Science* permite a classificação automática por departamento, pretende-se também fazer a pesquisa por afiliação na Universidade da Madeira, além da pesquisa específica pelo país Portugal, para efetuar uma comparação nestes contextos.

### 2.3 REVISÃO DA LITERATURA

Uma revisão da literatura é uma pesquisa e avaliação da literatura disponível em determinado assunto com a pretensão de determinar o estado da arte atual. Após pesquisa e síntese, apresenta a literatura de forma organizada, procedendo a uma análise crítica da informação reunida com o intuito de identificar lacunas no conhecimento atual, limitações nas teoria e pontos de vista e formulação de área de investigação futura. (Royal Literary Fund. [RLF], (2024).

Assim, com este trabalho pretende-se apresentar uma resenha da literatura existente sobre o tratamento de águas residuais, agrupando-a nas categorias já existentes na *Web of Science*. Recorre-se à classificação por Tópicos de Citação, que são agrupamentos de documentos relacionados pelas suas citações, conforme ilustra a Figura 12. Os documentos são nomeados manualmente, conforme o seu conteúdo, em 10 Macro Tópicos, 326 Meso Tópicos, após o que são caracterizados por um algoritmo que os reúne em 2 444 Micro Tópicos, conforme as suas citações.

Como referido, e considerando que não é viável a revisão da literatura numa amostra de 90 178 resultados, a mesma recaí sobre os 272 documentos, selecionados conforme explanado na seleção da amostra do tema principal, tratamento de águas residuais.

Posteriormente será efetuada uma análise crítica dos documentos do tema principal com o intuito de verificar o estado da arte do conhecimento atual na área em estudo, identificar as suas possíveis lacunas e limitações e, se possível, apresentar soluções para as mesmas.

Será também elaborada uma abordagem aos documentos comuns ao tema adicional e ao tema principal, com o intuito de identificar as diferenças nos tratamentos por cloração e por ultravioleta.

Este procedimento será desenvolvido no capítulo 4.

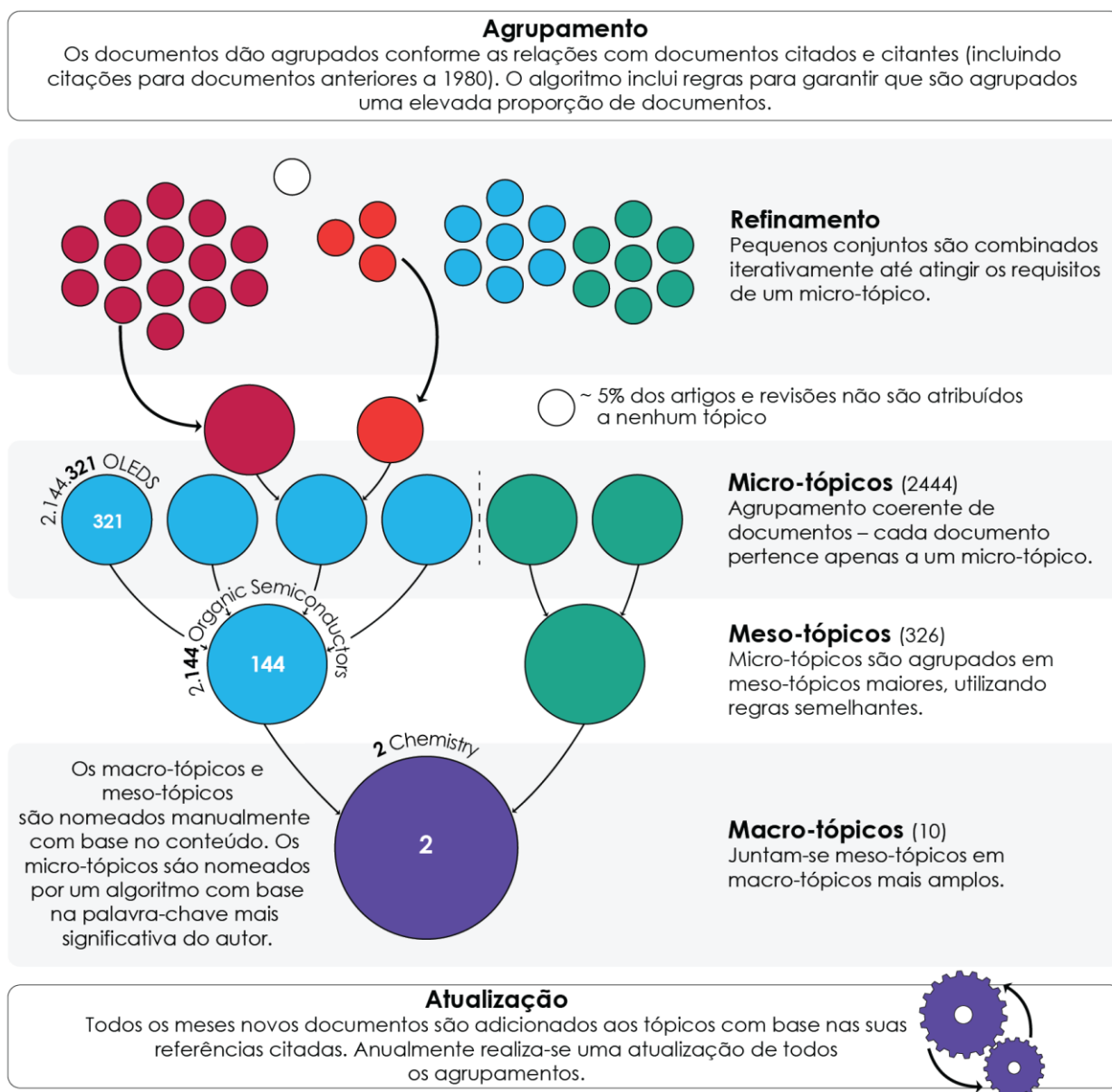


Figura 12 - Tópicos de Citação da *Web of Science*  
Fonte: Adaptado de Delgado (2023-2024)



## CAPÍTULO 3: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

### 3.1 INTRODUÇÃO

Conforme referido aquando da seleção da amostra, no presente trabalho, para a análise bibliométrica, e para a amostra inicial de 90 178 publicações, sobre o tema do tratamento de águas residuais, procedeu-se à análise dos seguintes parâmetros:

1. Evolução anual de publicações;
2. Tipo de publicação;
3. Áreas de estudo das publicações;
4. Países das publicações;
5. Principais publicações;
6. Principais instituições;
7. Objetivos de desenvolvimento sustentável.

Para a amostra de 272 documentos, sobre o tratamento de águas residuais, a qual será alvo da revisão da literatura, serão também analisadas as redes de co-ocorrência de palavras-chave, de colaboração internacional e de co-autoria de autores.

Posteriormente, será efetuada uma análise adicional sobre o tema do tratamento de águas residuais destinado à reutilização, sobre a evolução anual de publicações e seus países de origem, para as amostras de 737 e 5724 documentos relativos aos tratamentos por cloração e por ultravioleta, respetivamente.

Para as amostras de 24 e 178 documentos da análise adicional, será estudado a rede de co-ocorrência de palavras-chave e colaboração internacional entre países.

### 3.2 EVOLUÇÃO ANUAL DE PUBLICAÇÕES

Com recurso à opção Analisar Resultados disponível da *Web of Science*, foi possível exportar facilmente uma tabela com os dados referentes aos Anos de Publicação dos documentos selecionados, procedido de elaboração do gráfico constante na Figura 13.

Apesar do período em análise se iniciar em 1950, com a exclusão de material não relevante para a investigação, conforme explanado em 2.1.4, aquando da seleção da amostra, o primeiro documento sobre tratamento de águas residuais, das 90 178 publicações que constituem a amostra para a análise bibliométrica, foi publicado em 1960, tendo-se verificado um desenvolvimento gradual até 1980, período em que supera uma centena de documentos de documentos publicados, registando-se 126 publicações nesse ano.

Entre 1981 e 1990 observa-se uma redução para números inferiores à centena, sendo que a partir de 1991, com 165 publicações, observa-se um crescimento expressivo, ultrapassando em 2003 o milhar de publicações, com 1 001 registos.

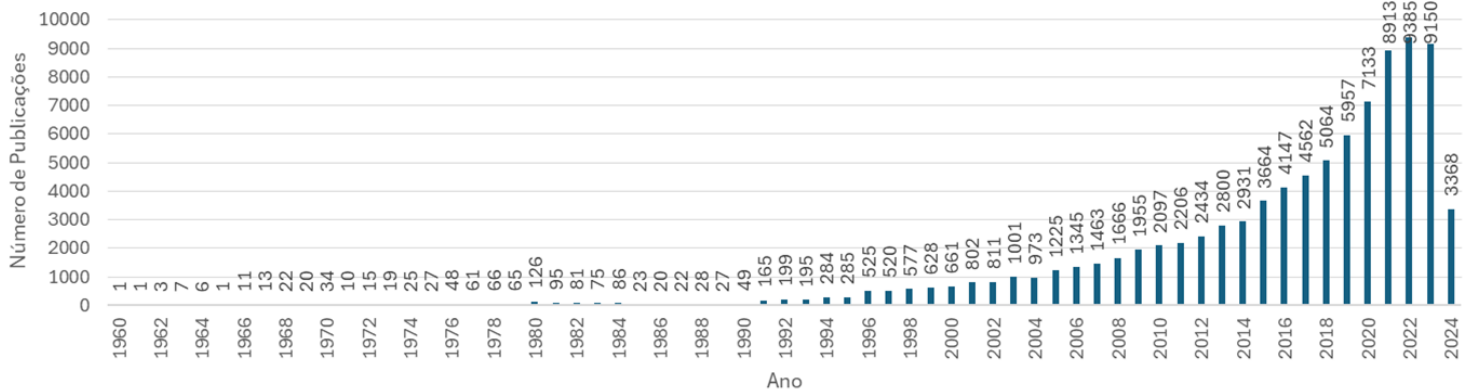


Figura 13 - Publicações por ano  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

Apesar de no ano seguinte, em 2004, ter-se reduzido para 973 documentos, a partir deste ano verifica-se um crescimento acentuado, com incremento anual de centenas de registos, até atingir o seu máximo em 2022, com 9 385 publicações.

O gráfico regista uma quebra acentuada em 2024 para 3 368 publicações, devido à pesquisa conter apenas as publicações registadas até 05 de junho de 2024. Apesar da amostra em estudo conter 126 documentos com data de publicação posterior à data de pesquisa, devido às revistas já terem disponibilizado conteúdo nas suas páginas eletrónicas, é previsível que este número seja muito superior no final do ano de 2024, uma vez que a maioria dos documentos apenas ficam disponíveis após a sua publicação.

Assim, verifica-se um aumento do interesse da comunidade no tratamento de águas residuais, uma vez que entre 1960 até 2003 publicou-se 7 740 documentos, correspondente a 8,6%, sendo que a partir de 2004 registam-se 82 438 documentos, relativos a 91,4% das publicações.

### 3.3 TIPOS DE PUBLICAÇÃO

Aquando da pesquisa inicial, o resultado continha documentos de vários tipos, sendo que se excluiu os seguintes tipos, por não constituírem documentos com conteúdo relevante para a investigação do tratamento de águas residuais:

- Análise de base de dados;
- Artigo de dados;
- Bibliografia;
- Carta;
- Crítica literária;
- Discussão;

Item de Notícias;

Material editorial;

Nota;

Reimpressão;

Resumo de Reunião;

Também se excluíram os documentos dos seguintes tipos por terem sido retirados pelo autor, instituição ou editora, por conterem erros ou dados infundados, não devendo por isso serem considerados na análise:

Correção

Retratação

Retratação de publicação

*Publication with expression of Concern*

Assim, os 90 178 documentos em análise distribuem-se pelos seguintes tipos:

Acesso antecipado – “Artigo que foi publicado eletronicamente por uma revista antes de ser atribuído a um volume e número específicos. Um artigo de Acesso Antecipado terá um tipo de documento duplo que incluirá o tipo de documento atribuído e o Acesso Antecipado: Artigo; Acesso antecipado. Quando o artigo é posteriormente indexado a partir da revista, ele será atualizado com o volume, fascículo, data, informações da página e o tipo de documento de acesso antecipado é removido.” “Como não se espera que o conteúdo mude entre a versão de acesso antecipado e a versão atribuída a um volume e edição específicos, o ano de acesso antecipado é considerado totalmente publicado, pois pode começar a acumular citações neste estado de acesso antecipado.” Clarivare (2024, tradução própria).

Artigo – “Relatórios de pesquisas sobre obras novas e originais que sejam consideradas citáveis. Inclui artigos de pesquisa, comunicações breves, notas técnicas, cronologias, artigos completos e relatos de casos (apresentados como artigos completos) que foram publicados numa revista e/ou apresentados em simpósio ou conferência. Os artigos geralmente incluem resumo do autor, gráficos, tabelas e listas de referências citadas.” Clarivare (2024, tradução própria).

Artigo de conferência – “Artigos completos numa ampla gama de área de pesquisa que foram ou serão apresentados em simpósio ou encontro. Os trabalhos a serem incluídos deverão ter sido apresentados na íntegra em conferência, reunião, simpósio ou encontro similar. Geralmente publicado num livro de anais de conferências.” Dado os registos incluídos nos índices SCIE, SSCI e AHCI serem também identificados como Artigo, quando publicados numa revista, os Artigos de Conferência estarão assim incluídos em 2 tipos de documentos. Clarivare (2024, tradução própria).

Artigo de revisão – “Um artigo de revisão pode resumir estudos publicados anteriormente e tirar algumas conclusões, mas não apresentará novas informações sobre o assunto. Inclui Resenhas, Revisão

de Literatura, Pequenas revisões e Revisões Sistemáticas.” “Artigos de revisão apresentados em Simpósio ou Conferência serão processados como Artigo de conferência”. Clarivare (2024, tradução própria).

Capítulos de livros – “Uma monografia ou publicação escrita sobre um tópico específico dentro de uma divisão principal de um livro.” Clarivare (2024, tradução própria).

Considerando que alguns deles podem se incluir em mais do que um tipo, apresenta-se os resultados em percentagem do número total de documentos.

Assim, observando a Figura 14, verifica-se que 80% das publicações são do tipo Artigos, com 76 625 documentos. De seguida, estão os Artigos de conferência com 10 294 documentos representando 11% da pesquisa. Contam-se 7 532 Artigos de revisão, 8 % dos documentos, sendo os Capítulos de livros e publicações de Acesso antecipado 1% das publicações com 1 005 documentos.

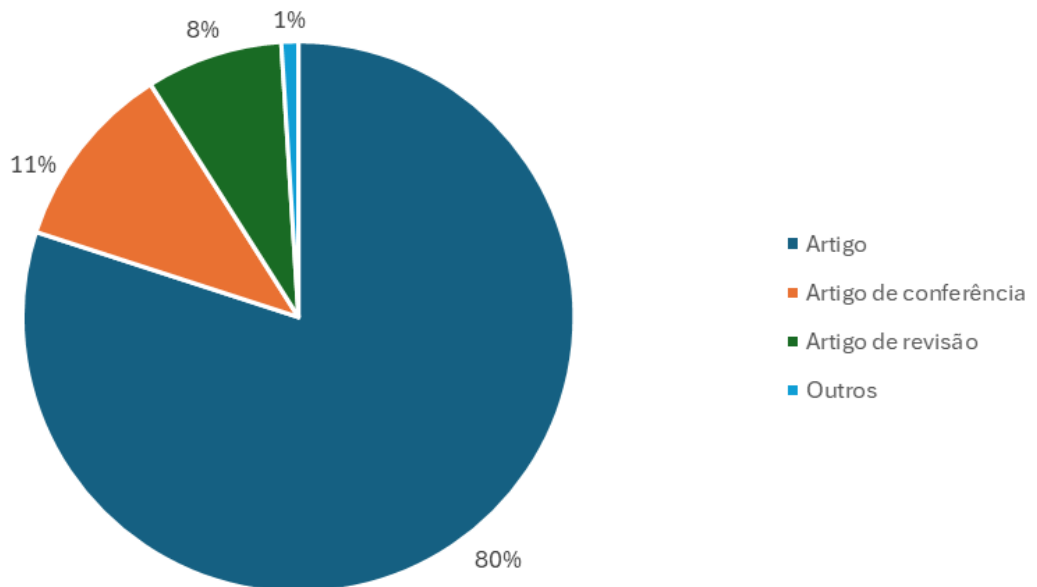


Figura 14 - Tipos de publicação  
Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

### 3.4 PALAVRAS-CHAVE

Para análise das palavras-chave, assim como para a revisão da literatura, utiliza-se a amostra de 272 documentos.

Acedendo ao *VOSviewer*, na opção Create, escolhe-se o tipo de informação para criação do mapa. Como será utilizada a informação extraída da *Web of Science*, opta-se por criar um mapa baseado em

informação bibliográfica. A fonte de informação será lida de ficheiro de base de dados bibliográficos. Este procedimento será replicado para a criação de todas as redes no *VOSviewer*.

Para a criação de rede de palavras-chave, seleciona-se um tipo de análise de co-ocorrência com a unidade de análise de todas as palavras-chave. Existe a hipótese de executar esta rede com base apenas nas palavras-chave do autor ou nas *Keyword Plus*, geradas pela *Web of Science*, mas de forma à rede ficar mais completa, optou-se por utilizar todas as palavras-chave. O método de contagem é a contagem completa em vez da contagem fracionada de palavras-chave. Foi escolhido o número mínimo de ocorrência de 3 palavras-chave, sendo que das 477 palavras-chave, 34 cumprem com este mínimo.

Exportou-se a lista de palavras-chave utilizada e recorrendo à opção *Screenshot* é possível guardar a rede gerada.

### 3.4.1 Principais palavras-chave

A Figura 15 apresenta as palavras-chave com mais de 5 ocorrências. Verifica-se que a palavra remoção tem 22 ocorrências, seguida de tratamento de águas residuais com 20, adsorção com 18, solução aquosa com 12, degradação e azul de metileno com 9, oxidação com 7 e carvão ativado, soluções aquosas e coloração com 6 ocorrências cada.

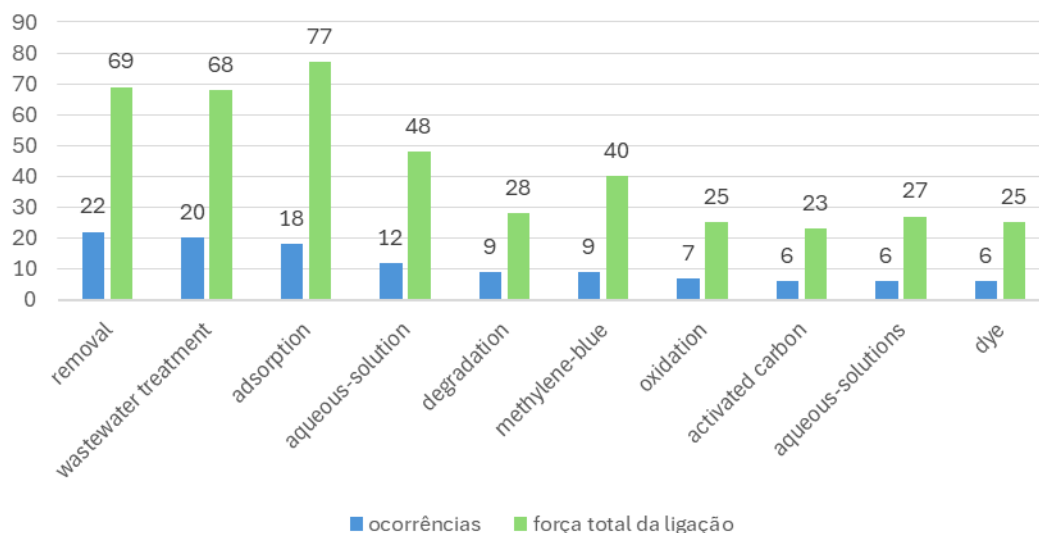


Figura 15 - Ocorrência e força total da ligação das palavras-chave  
Elaboração própria com base no *VOSviewer*

A força total de ligação das palavras-chave revela, conforme já referido, o grau de ligação entre as respetivas. Constata-se que a força total de ligação atinge os seus valores máximos entre estas 10 palavras-chave com maior número de ocorrências.

## 3.4.2 Co-ocorrência de palavras-chave

Analisando a rede criada pelo VOSviewer, apresentada na Figura 16, observa-se que as 34 palavras-chave que cumpriam o mínimo de 3 ocorrências foram agrupadas em 4 conjuntos, sendo que os nós com maior volume (*adsorption* a amarelo, *removal* a verde e *wastewater treatment* a azul) são os que representam a maior força de ligação entre palavras-chave.

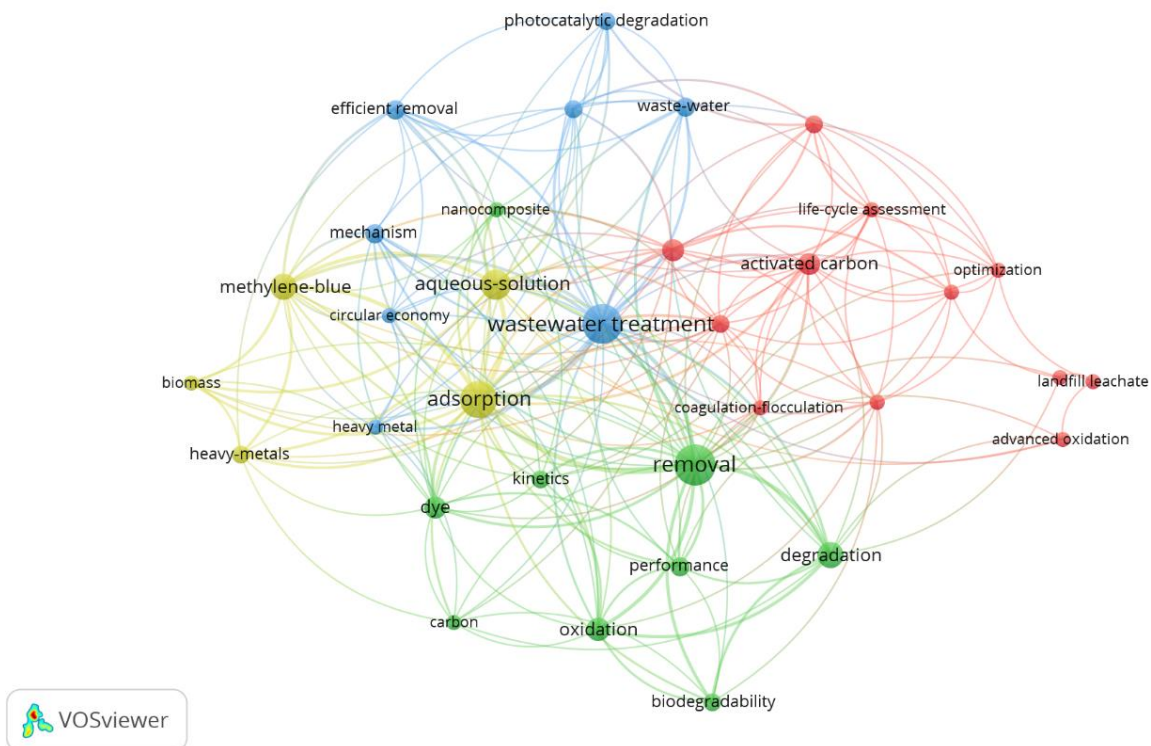


Figura 16 - Rede de co-ocorrência de palavras-chave  
Fonte: Elaboração no VOSviewer

O conjunto 1, representado a cor vermelha é o maior agrupamento e conta com 12 palavras-chave, sendo elas: *activated carbon* e *aqueous-solutions*, com 6 ocorrências cada, *dye removal* e *advanced oxidation processes* com 4 ocorrências e *advanced oxidation*, *coagulation-flocculation*, *electrocoagulation*, *landfill leachate*, *life-cycle assessment*, *optimization*, *ozonation* e *treatment plants*, cada uma com 3 ocorrências.

De seguida, constam no conjunto 2, de cor verde na rede representada na Figura 16, com 9 palavras-chave: *removal*, com 22 ocorrências, *degradation* com 9, *oxidation* com 7, *dye* com 6, *performance* com 5, *kinetics* e *biodegradability* com 4 cada e *nanocomposite* e *carbon* com 3 ocorrências cada.

O conjunto 3, de cor azul, tem ligações de 8 palavras-chave: *wastewater treatment* com 20 ocorrências, *waste-water*, *mechanism* e *efficient removal* com 5 ocorrências cada, *organic pollutants* e *photocatalytic degradation* com 4 cada e *heavy metal* e *circular economy* com 3 ocorrências cada.

O último conjunto, de cor amarela, tem ligações de 5 palavras-chave: *adsorption*, com 18 ocorrências, *aqueous-solution* com 12, *methylene-blue* com 9, *heavy-metals* com 4 e *biomass* com 3 ocorrências.

### 3.5 ÁREAS DE ESTUDO

Para determinação das áreas de estudo e sobre a amostra de 90 178 documentos, recorreu-se ao filtro Áreas de pesquisa. Considerando que cada documento pode ter mais do que uma área de pesquisa ou de estudo, aferiu-se a percentagem relativa ao número total de documentos das diversas áreas de pesquisa, representadas na Figura 17. Assim, verifica-se que a área de pesquisa com mais publicações é Ciências Ambientais e Ecologia, com 24,4% seguida da área de Engenharia com 24,1%.

A área de Recursos Hídricos tem 12% das publicações, seguida da Química com 7%, e das áreas da Microbiologia Aplicada à Biotecnologia, de Outros Tópicos de Ciência e Tecnologia e da Ciência dos Materiais, cada uma com aproximadamente com 4% de publicações.

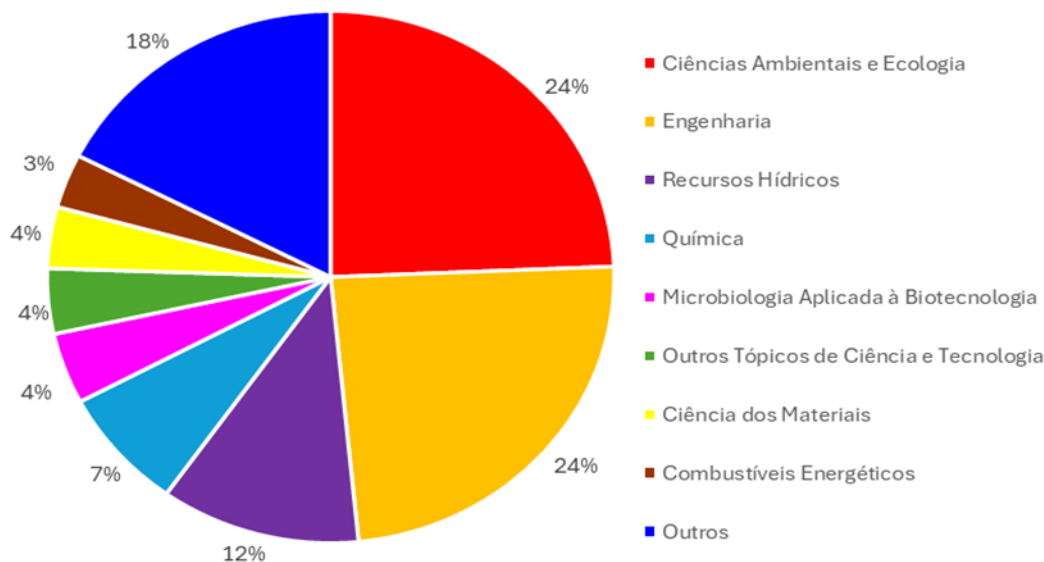


Figura 17 - Áreas de estudo  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

A área dos Combustíveis Energéticos tem 3% de publicações e os restantes 17,5% distribuem-se entre outras 115 áreas, todas com percentagens iguais ou inferiores a 2% cada, sendo que as áreas com

mais de 1% de publicações são, em ordem decrescente, Agricultura, Física, Microbiologia, Ciência dos Polímeros, Biologia Marinha de Água Doce e Bioquímica Biologia Molecular.

Assim, observa-se que o tratamento de águas residuais é um tópico que se abrange diversas áreas de estudo, apesar de recair primeiramente sobre as áreas relacionadas com ambiente e ciências.

### 3.6 PAÍSES DAS PUBLICAÇÕES

As publicações sobre tratamento de águas residuais da amostra de 90 178 estão identificadas na *Web of Science* como oriundas de 182 países.

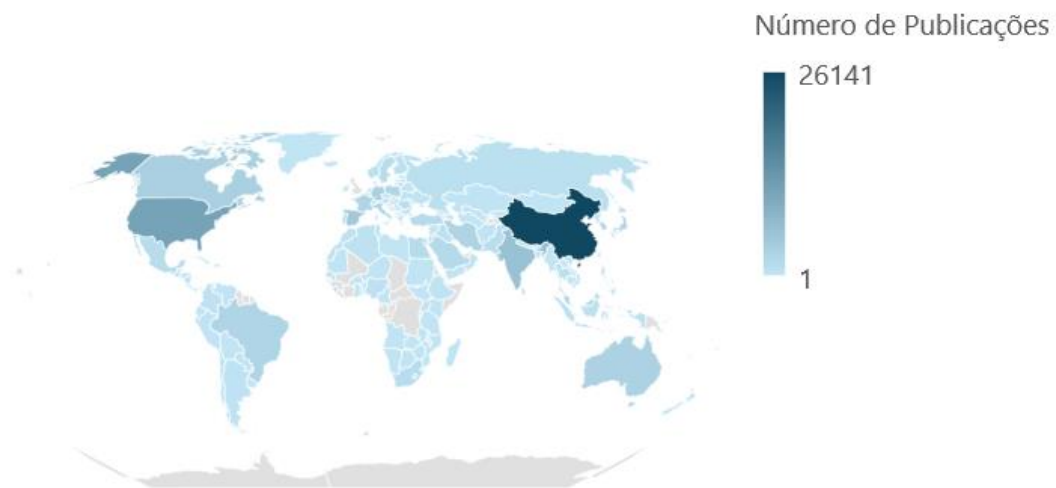
Na Figura 18 observa-se que as publicações se distribuem pelos 5 continentes sendo que os países com mais de 1 000 publicações são, por ordem decrescente: China, Estados Unidos da América, Índia, Espanha, Canadá, Alemanha, Austrália, Coreia do Sul, Itália, Irão, Brasil, Japão, Inglaterra, França, Polónia, Malásia, Arabia Saudita, Turquia, Egipto, Países Baixos, Tailândia, Portugal, México, Suécia, África do Sul, Paquistão, Bélgica, Dinamarca, Grécia e Suíça.

Na Figura 19 apresentam-se as percentagens e número de documentos dos 25 países com mais publicações. O país mais produtivo foi a China com 26 141 documentos, 29% do total, seguida dos Estados Unidos da América com 11 060 documentos, correspondente a 12,3% e da Índia com 5 755 documentos, 6,4% das publicações. Verificou-se que estes 3 países são também os países com maior número de população, conforme aferível no sítio *PopulationPyramid.net* e extrato do mesmo, constante no Anexo, pelo que este poderá ser também um fator de influência do número de publicações.

Todos os demais países apresentam percentagens inferiores a 4% das publicações, referindo-se que Portugal, com 1 375 documentos publicados, constitui 1,5% das publicações, tal como o México, a Suécia e a África do Sul.

O gráfico da Figura 20 representa as publicações atribuídas a Portugal. Verifica-se que as mesmas ocorreram entre os anos de 1989 e o corrente ano, tendo vindo a aumentar gradualmente, atingindo as 5 dezenas em 2013, com uma quebra em 2014, mas a partir de 2015, as publicações têm vindo a aumentar até atingir o seu máximo em 2021 com 157 documentos.

Refere-se novamente que os dados de 2024 se referem aos documentos já publicados até 05 de junho de 2024 ou com data de publicação já disponibilizada nos sítios das revistas, pelo que previsivelmente este número ainda aumentará no presente ano.



Com tecnologia Bing

Figura 18 - Países das publicações  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

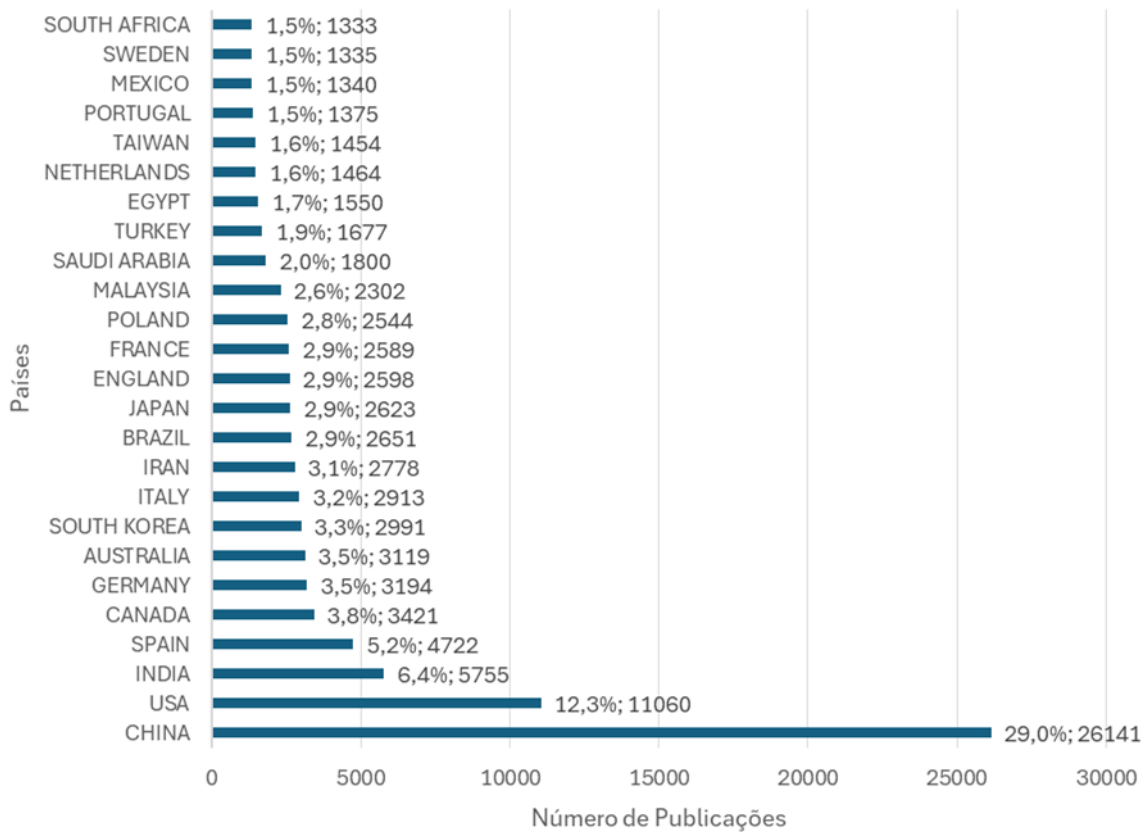


Figura 19 - 25 países com mais publicações  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

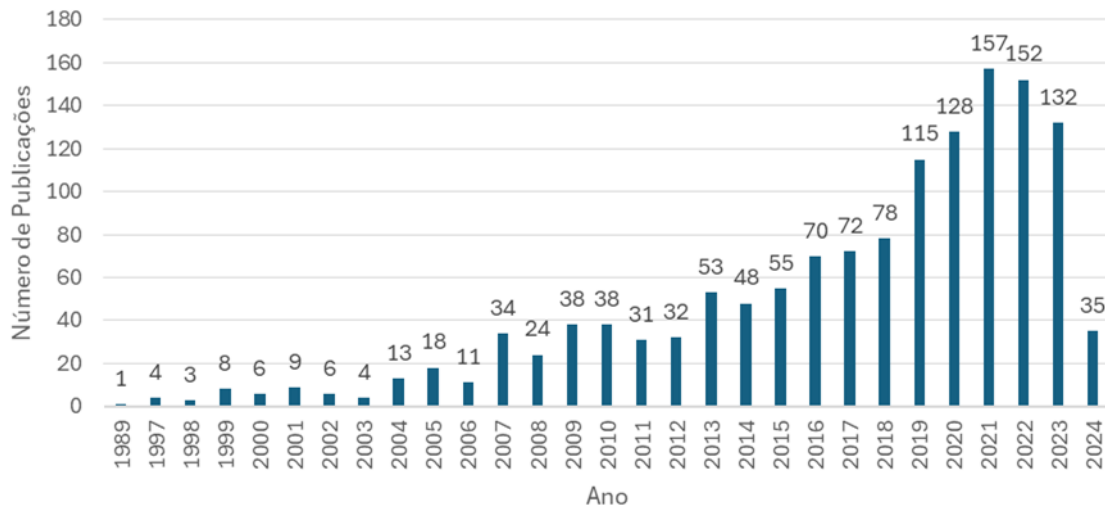


Figura 20 - Publicações de Portugal  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

### 3.6.1 Idiomas das publicações

Na amostra de 90 178 documentos em análise estão identificados 29 idiomas, sendo o inglês o idioma predominante. Na Figura 21 pode observar-se os 10 idiomas com mais publicações. Assim, em inglês estão 98,6% das publicações com 88 958 documentos, seguido do idioma chinês, polaco, espanhol, português, alemão, russo, francês, japonês e checo.



Figura 21 - Idiomas das publicações  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

De referir que, apesar de Portugal não ser um dos países que mais publica sobre o tema do tratamento de águas residuais, é o quinto idioma com mais documentos, porventura devido às publicações oriundas do Brasil.

A revisão da literatura a efetuar no capítulo seguinte recaí, conforme explanado anteriormente, sobre 272 documentos, sendo que 270 são de língua inglesa, 1 de língua portuguesa e 1 de língua espanhola. Esta particularidade adequa-se à capacidade de análise do presente estudo, uma vez que sendo de outros idiomas distintos, não seria possível a sua interpretação por falta de domínio do idioma.

#### 3.6.2 Colaboração Internacional

A análise da colaboração internacional entre países realiza-se para a amostra de 272 documentos.

Para a rede de colaboração internacional, e com recurso ao *VOSviewer*, escolheu-se o tipo de análise por co-autoria e países como unidade de análise, com o método de contagem completa, para o mínimo de 1 documento por país e número mínimo de 0 citações de cada país. Apesar dos 34 países cumprirem os valores mínimos, apenas 18 deles têm ligação, pelo que escolheu-se mostrar apenas estes, agrupados em 4 conjuntos.

Observa-se na Figura 22 que o conjunto com mais elementos, a vermelho regista a colaboração de 6 países: Brasil, Alemanha, Irão, Cazaquistão, Polónia e Portugal. Segue-se o conjunto verde, com 4 países: Egípto, Índia, Escócia e Vietname. O conjunto 3, a azul, conta com 4 países: Malásia, Paquistão, Arábia Saudita e Emirados Árabes Unidos. O 4.º conjunto, a amarelo, tem o mesmo número de países que o anterior: Austrália, Bélgica, Inglaterra e Espanha.



Figura 22 - Colaboração internacional  
Fonte: Elaboração no *VOSviewer*

### 3.7 CITAÇÕES

#### 3.7.1 Artigos com mais citações

Para a análise das citações, recorre-se à amostra de 272 documentos. Nas tabelas seguintes, constam, em 2 partes, os artigos com mais de 200 citações. Na Figura 23 representa-se o número total de citações desses artigos.

Assim, o artigo “*Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment*”, de Crini & Lichtfouse conta com o maior número de citações, 1 116, tendo sido publicado em 2019. Este é um artigo deveras interessante, por se apresentar numa forma gráfica, com tabelas resumo de fácil consulta. Com 976 citações, escrito por Deng & Zhao “*Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment*”, publicado em 2015, é o artigo com 2.º maior número de citações.

Na 3.ª posição em termos de número de citações, partilhando 2 autores com o artigo mais citado, está o “*Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment*” de Crini, Lichtfouse, Wilson & Morin-Crini, publicado em 2019 e com 795 citações.

Tabela 2 - Artigos com mais de 200 citações (Parte 1)

| Posição | Artigo   | Autores  | Ano da publicação |
|---------|--|--|-------------------|
| 1       | <i>Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment</i>  | Crini, Gregorio; Lichtfouse, Eric  | 2019              |
| 2       | <i>Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment</i>   | Deng, Yang; Zhao, Renzun   | 2015              |
| 3       | <i>Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment</i>   | Crini, Gregorio; Lichtfouse, Eric; Wilson, Lee D.; Morin-Crini, Nadia  | 2019              |
| 4       | <i>Organic wastewater treatment by a single-atom catalyst and electrolytically produced H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></i> | Xu, Jinwei; Zheng, Xueli; Feng, Zhiping; Lu, Zhiyi; Zhang, Zewen; Huang, William; Li, Yanbin; Vuckovic, Djordje; Li, Yuanqing; Dai, Sheng; Chen, Guangxu; Wang, Kecheng; Wang, Hansen; Chen, James K.; Mitch, William; Cui, Yi | 2021              |
| 5       | <i>Role of Nanomaterials in the Treatment of Wastewater: A Review</i>  | Yaqoob, Asim Ali; Parveen, Tabassum; Umar, Khalid; Ibrahim, Mohamad Nasir Mohamad  | 2020              |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 - Artigos com mais de 200 citações (Parte 2)

| Posição | Artigo  | Autores   | Ano da publicação |
|---------|---|---|-------------------|
| 6       | <i>Graphene based adsorbents for remediation of noxious pollutants from wastewater</i>  | Ali, Imran; Basheer, Al Arsh; Mbianda, X. Y.; Burakov, Alexander; Galunin, Evgeny; Burakova, Irina; Mkrtychyan, Elina; Tkachev, Alexey; Grachev, Vladimir | 2019              |
| 7       | <i>Production and applications of activated carbons as adsorbents from olive stones</i>   | Saleem, Junaid; Bin Shahid, Usman; Hijab, Mouhammad; Mackey, Hamish; McKay, Gordon  | 2019              |
| 8       | <i>Advanced oxidation processes (AOPs) based wastewater treatment - unexpected nitration side reactions-a serious environmental issue: A review</i> | Rayaroth, Manoj P.; Aravindakumar, Charuvila T.; Shah, Noor S.; Boczkaj, Grzegorz   | 2022              |
| 9       | <i>Assessment of Sulfate Radical-Based Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment: A Review</i>                                | Guerra-Rodriguez, Sonia; Rodriguez, Encarnacion; Singh, Devendra Narain; Rodriguez-Chueca, Jorge  | 2018              |

Fonte: Elaboração própria

Nas restantes posições das Tabelas 2 e 3 estão artigos com 348 a 217 citações, sendo que após a posição 9 todos os artigos têm menos de 200 citações.

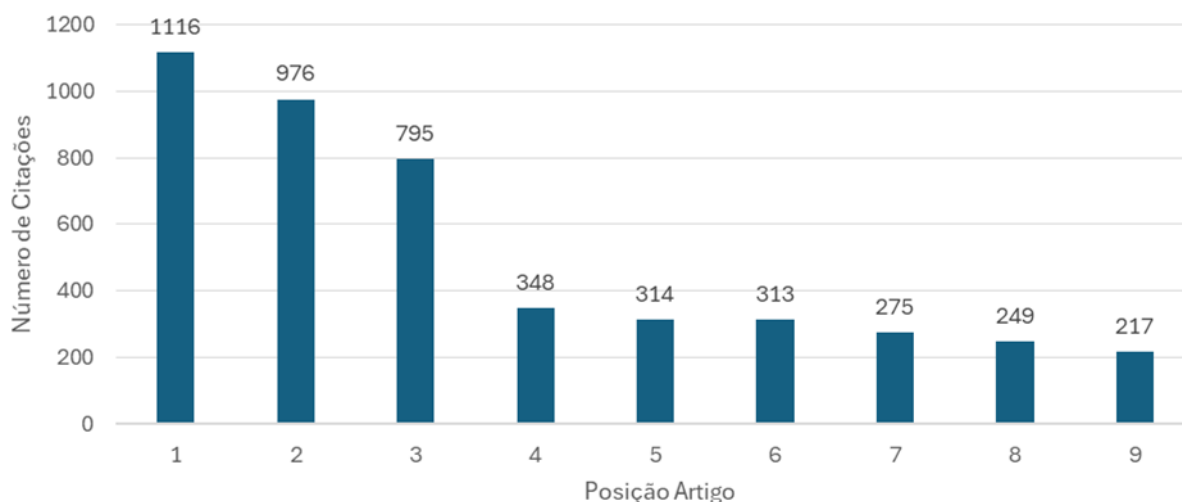


Figura 23 - Artigos com mais de 200 citações  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

### 3.7.2 Média anual de citações

A Figura 24 exibe a média de citações dos 9 artigos identificados nas Tabelas 2 e 3. Verifica-se que os artigos nas posições 1 a 8 são os que detêm também o maior número de citações.

Assim, o artigo na posição 1, publicado em 2019, tem o maior número médio de citações por ano, seguido do 2.º artigo, publicado em 2015, com média de 132,5 citações e do 3.º artigo, publicado também em 2019, com média de 97,6 citações.

Os artigos nas posições 4 a 8, publicados entre 2019 e 2022 têm médias de citação entre 69,6 e 45,8.

O artigo na posição 9, da Tabela 3 tem uma média de 31 citações, sendo que, na amostra de 272, existem outros 6 artigos, com médias situadas entre 45 e 31 citações, publicados entre 2020 e 2021.

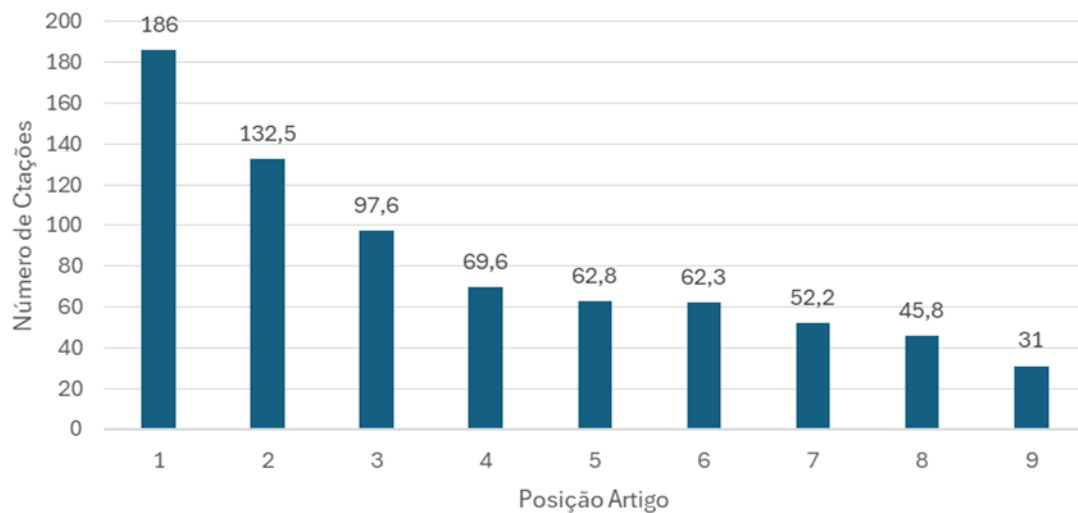


Figura 24 - Média de citações por artigo  
Elaboração própria com base na *Web of Science*

### 3.7.3 Citações por ano

Na Figura 25 observa-se o número máximo de citações por ano, para o total de todos os artigos. Verifica-se que o primeiro artigo recebeu uma citação em 1982, tendo o número de citações se mantido inferior à centena até 2015.

Entre 2016 e 2019 o número de citações manteve-se na ordem das centenas, superando o milhar em 2020, com 1 155 citações distribuídas por 118 artigos.

Em 2021 registaram-se 2 209 citações para 175 artigos, em 2022, 3 120 em 233 artigos e em 2023, 3 417 citações em 256 artigos.

### Capítulo III

Em 2024 ocorre um decréscimo para 1 423 citações em 208 artigos, sendo de referir que a amostra foi extraída no início de junho do corrente ano, pelo que se prevê o seu incremento até ao final do ano.

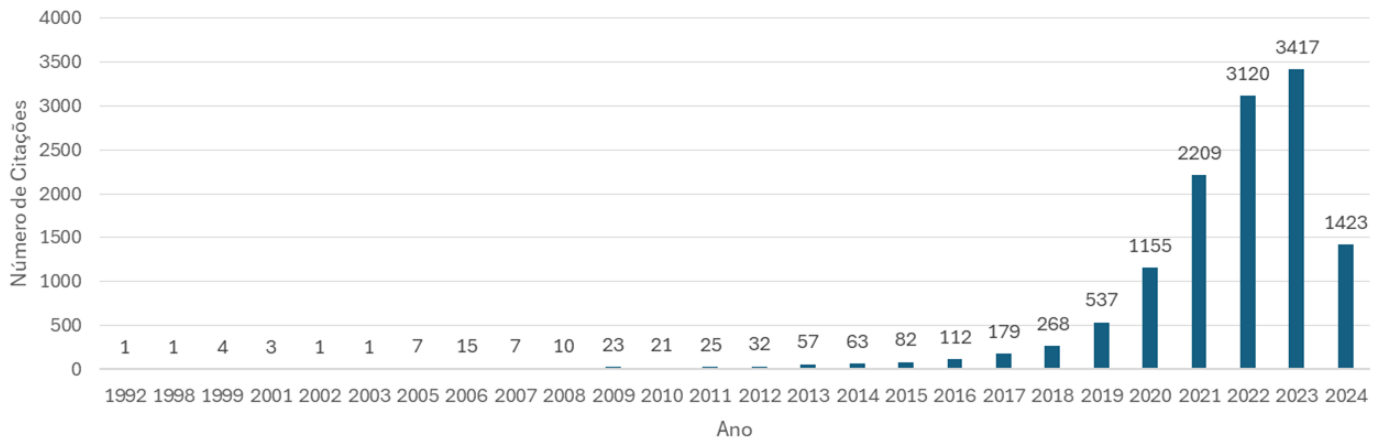


Figura 25 - Número de citações por ano  
Elaboração própria com base na *Web of Science*

## 3.8 AUTORES

### 3.8.1 Autores com mais publicações

Existem 1 251 autores identificados nos 272 documentos que constituem a amostra. Os principais, identificados na Figura 26, são os que têm 3 e 4 artigos publicados. 62 autores têm o seu nome associado a 2 documentos e 1 178 apenas a 1 artigo.

Os autores com mais publicações são Gregorio Crini da Universidade Borgonha Franche-Comté, em França, Michael R. Hoffmann do Instituto de Tecnologia da Califórnia, nos Estados Unidos da América e Manuel Andres Rodrigo da Universidade de Castela-Mancha em Espanha, cada com 4 artigos publicados.

Têm 3 artigos publicados Antonio Arques, da Universidade Politécnica de Valência em Espanha, Grzegorz Boczkaj da Universidade Técnica de Gdańsk, na Polónia, Pablo Canizares da Universidade de Castela-Mancha em Espanha, Yung-Tse Hung da Universidade Estatal de Cleveland no Estados Unidos da América, Eric Lichtfouse da Universidade de Aix-Marselha, na França, Javier Llanos também da Universidade de Castela-Mancha em Espanha, Farooq Sher da Universidade de Nottingham Trent em Inglaterra e Yang Yang do Instituto de Tecnologia da Califórnia, nos Estados Unidos da América.

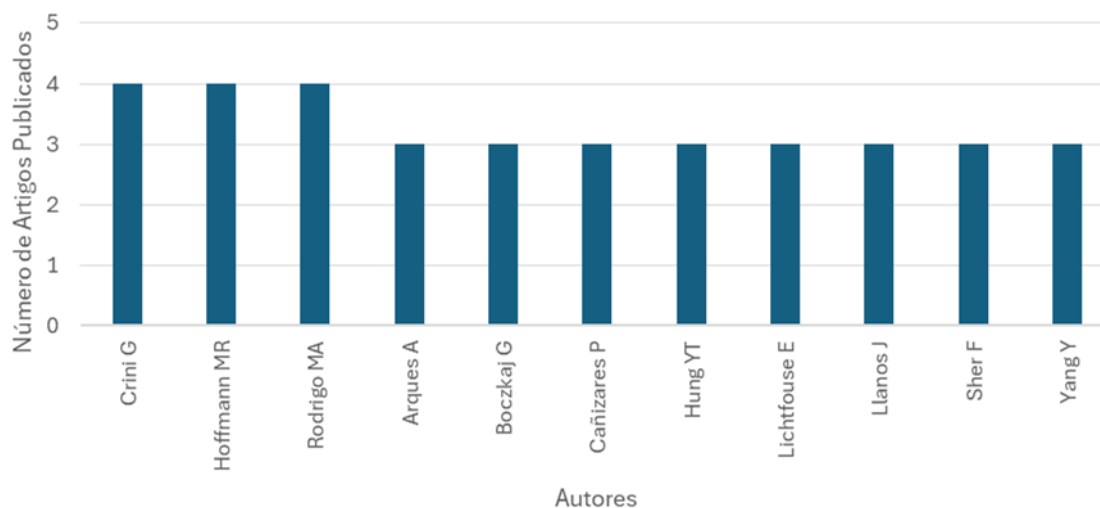


Figura 26 - Autores com mais de 3 artigos publicados  
Elaboração própria com base na *Web of Science*

### 3.8.2 Autores mais citados

Na Figura 27 observam-se os autores que contam com maior número de citações.

Os autores Tariq Alsawy da Universidade de Zagazig, Mohamed El-Qelish do Centro Nacional de Pesquisa, Ramy H. Mohammed também da Universidade de Zagazig, e Emanne Rashad da Universidade de Alexandria, todos localizado no Egito, partilham 91 citações com o artigo de que são coautores, *A comprehensive review on the chemical regeneration of biochar adsorbent for sustainable wastewater treatment* publicado na revista *NPJ Clean Water*, em 2022.

Com 82 citações contam os coautores do artigo, *Nitrogen-doped biochars as adsorbents for mitigation of heavy metals and organics from water: a review*, publicado em 2022 na revista *BIOCHAR: Steven G. Hall, Nitesh Kumar Kasera e Praveen Kolar* associados à Universidade do Estado da Carolina do Norte nos Estados Unidos da América.

Suresh Sagadevan da Universidade Malaia, na Malásia, soma 32 citações para os seus 2 artigos publicados, *Applications of polyaniline-impregnated silica gel-based nanocomposites in wastewater treatment as an efficient adsorbent of some important organic dyes* e *Process Technology and Sustainability Assessment of Wastewater Treatment*, respetivamente em 2022 e 2023, nas revistas *Green Processing And Synthesis* e *Industrial & Engineering Chemistry Research*.

Harjot Kaur, Adesh Kumar Saini, Karamveer Sheoran, Samarjeet Singh Siwal, Vijay Kumar Thakur e Dai-Viet N. Vo partilham 29 citações com o seu artigo, *Recent advances of carbon-based nanomaterials (CBNMs) for wastewater treatment: Synthesis and application*, publicado na *Chemosphere*, em 2022.

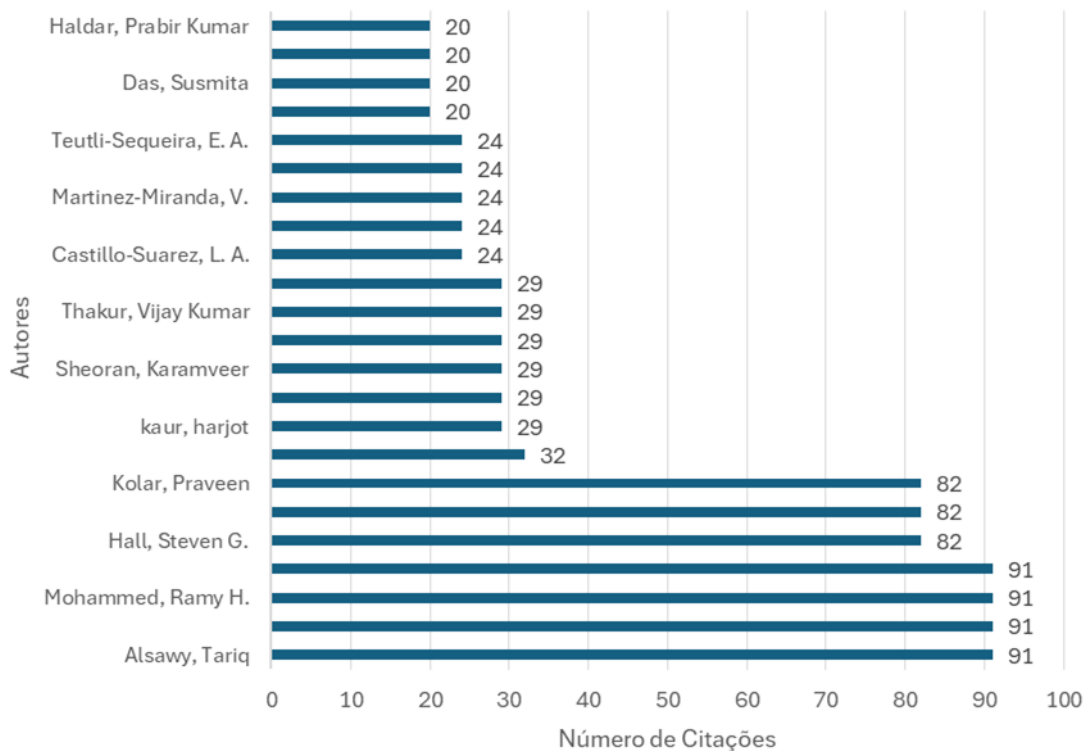


Figura 27 - Autores mais citados  
 Fonte: Elaboração própria com base no VOSviewer

L. A. Castillo-Suarez, I. Linares-Hernandez, V. Martinez-Miranda, A. G. Sierra-Sanchez e E. A. Teutli-Sequeira contam com 24 citações com o seu artigo, *A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes*, publicado em 2023 no *International Journal of Environmental Science and Technology*.

Goutam Biswas, Susmita Das, Nikita Ghosh e Prabir Kumar Haldar são os autores com 20 citações pelo artigo *Review on some metal oxide nanoparticles as effective adsorbent in wastewater treatment*, publicado em 2022 na revista *Water Science and Technology*.

Verifica-se que os autores que têm 20 ou mais citações publicaram os seus artigos recentemente, nos anos de 2022 e 2023, o que demonstra o rápido reconhecimento da comunidade investigadora nos seus trabalhos.

### 3.8.3 Co-autoria

Para a co-autoria de autores, escolhe-se o tipo de análise co-autoria e a unidade de análise autores, para um mínimo de 1 documento por autor e de 0 citações por autor, sendo que apesar dos 265 autores estarem dentro dos limites, apenas 19 estão ligados em 2 conjuntos, representados na Figura 28.

O conjunto maior, a vermelho conta com 12 ligações e o conjunto verde com 7.

Verifica-se que o autor com maior número de ligações e que une os 2 conjuntos é Adrian M. T. Silva, da Universidade do Porto em Portugal. Verifica-se que os dois conjuntos identificados são compostos pelos coautores dos 2 documentos que publicou em 2022 e 2023, pelo que não se verifica a existência de uma rede de co-autoria de investigadores nesta área.

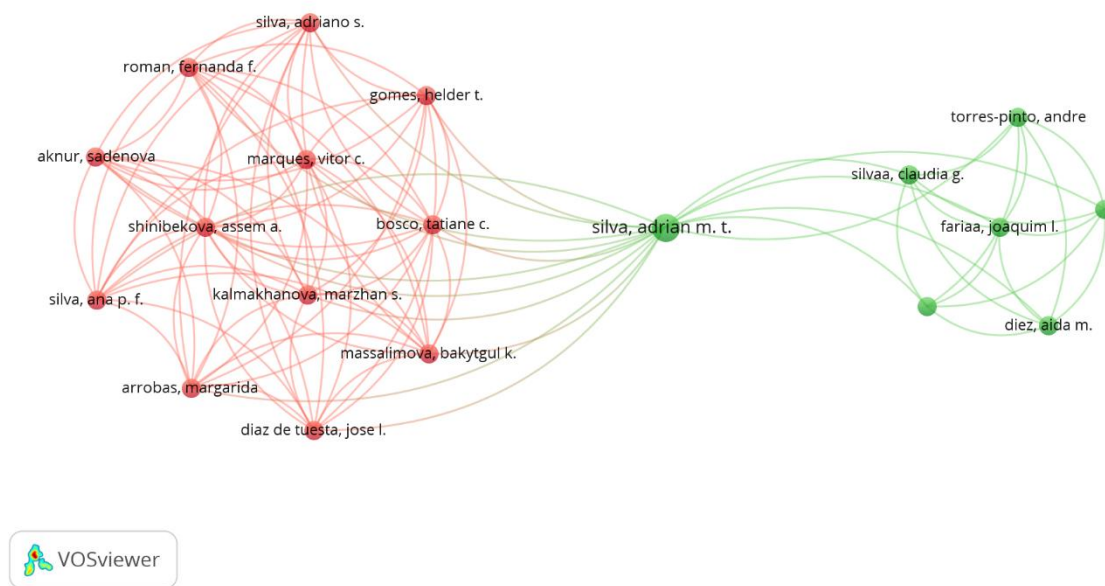


Figura 28 - Rede de co-autoria de autores  
 Fonte: Elaboração no VOSviewer

### 3.9 PRINCÍPIAIS INSTITUIÇÕES

Com recurso ao filtro Afiliações é possível extrair uma listagem de todas as instituições que colaboraram nos 90 178 documentos. Constata-se um vasto número, superior a 27 000 instituições identificadas. Assim, elaborou-se o gráfico constante na Figura 29, onde se observa as 26 instituições com mais de 500 publicações, responsáveis por 25% das publicações.

A instituição presente em mais artigos é a *Chinese Academy of Sciences*, da China, com 2 924 artigos, 3,24% do total, seguida do *Egyptian Knowledge Bank EKB*, do Egipto, com 1 503 documentos correspondentes a 1,67% da amostra e da *Harbin Institute of Technology*, também da China, com 1 443 registos que equivalem a 1,6%.

Estas principais instituições estão distribuídas por 12 países, dos 5 continentes, conforme se depreende da observação da Figura 30. Assim, originárias de 11 instituições da China vêm 11 093

documentos, 12,3% das publicações. Além das 2 já referidas anteriormente, registam-se 1 253 documentos da *Tsinghua University*, 922 da *Tongji University*, 913 da *University of Chinese Academy of Sciences CAS*, 736 do *Research Center for Eco Environmental Sciences RCEES*, 646 da *Beijing University of Technology*, 640 da *Zhejiang University*, 564 da *South China University of Technology*, 533 da *Shandong University* e 519 da *Nanjing University*.

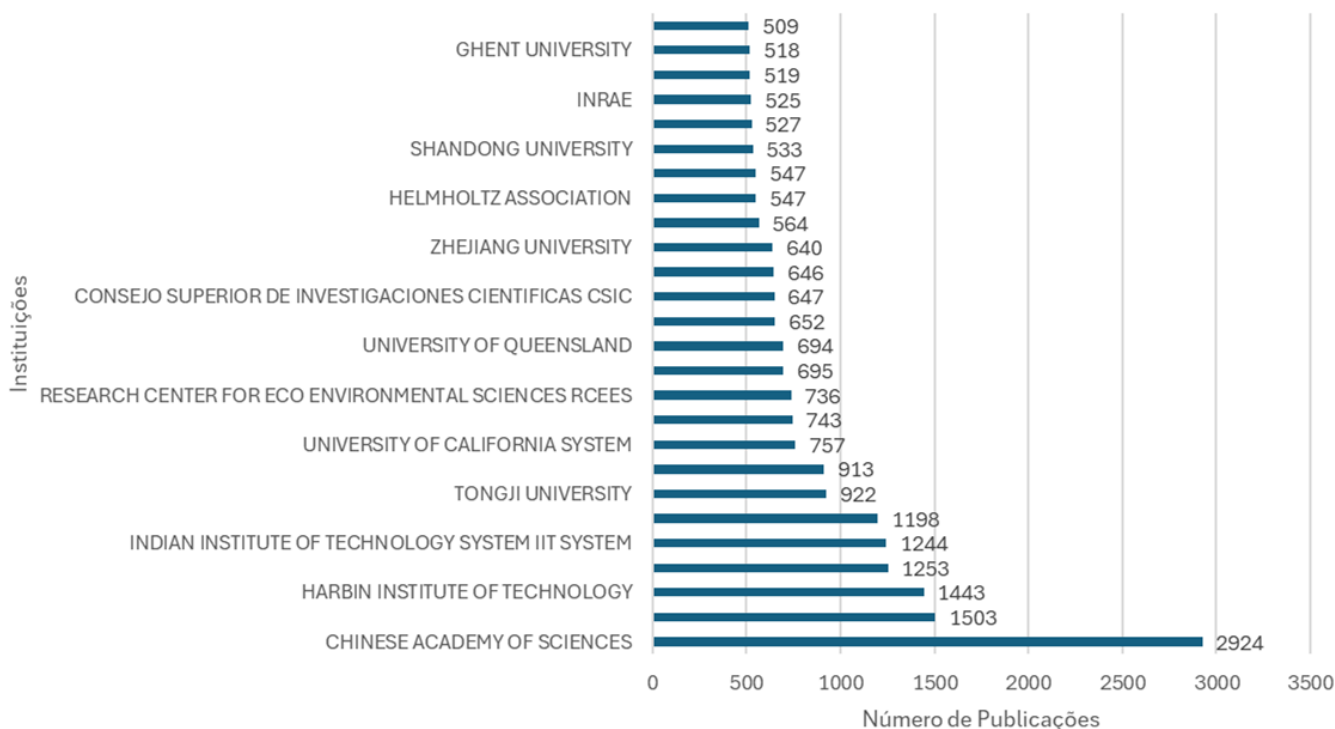


Figura 29 - Principais instituições  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

De seguida, estão 3 instituições da Índia, identificadas em 2,9 % dos documentos, sendo elas o *Indian Institute of Technology System IIT System*, com 1 244 registos, seguido do *National Institute of Technology NIT System*, com 695 documentos e do *Council of Scientific Industrial Research CSIR India*, com 652 publicações.

Da França estão presentes duas instituições com 1,9% das publicações, o *Centre National de la Recherche Scientifique CNRS*, com 1 198 documentos e o *INRAE* com 525 publicações.

O quarto país com maior número de publicações é o Egito, sendo que estes documentos provêm apenas da instituição já identificada no segundo parágrafo.

A Suíça conta com 2 instituições com 1,4% das publicações, o *Swiss Federal Institutes of Technology Domain*, com 744 e o *Swiss Federal Institute of Aquatic Science Technology EAWAG*, com 509 documentos.

A 6.<sup>a</sup> posição é representada apenas por uma instituição dos Estados Unidos da América, a *University of California System*, de onde vêm 757 documentos, seguida da *University of Queensland*, na Austrália, 694 publicações e do *Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC*, na Espanha, 647 registos. Da *Helmholtz Association*, na Alemanha e da *Universiti Teknologi Malaysia*, na Malásia, procedem 547 documentos, cada. Da *Delft University Of Technology*, nos Países Baixos, 527 registos e da *Ghent University*, na Bélgica 518 publicações.

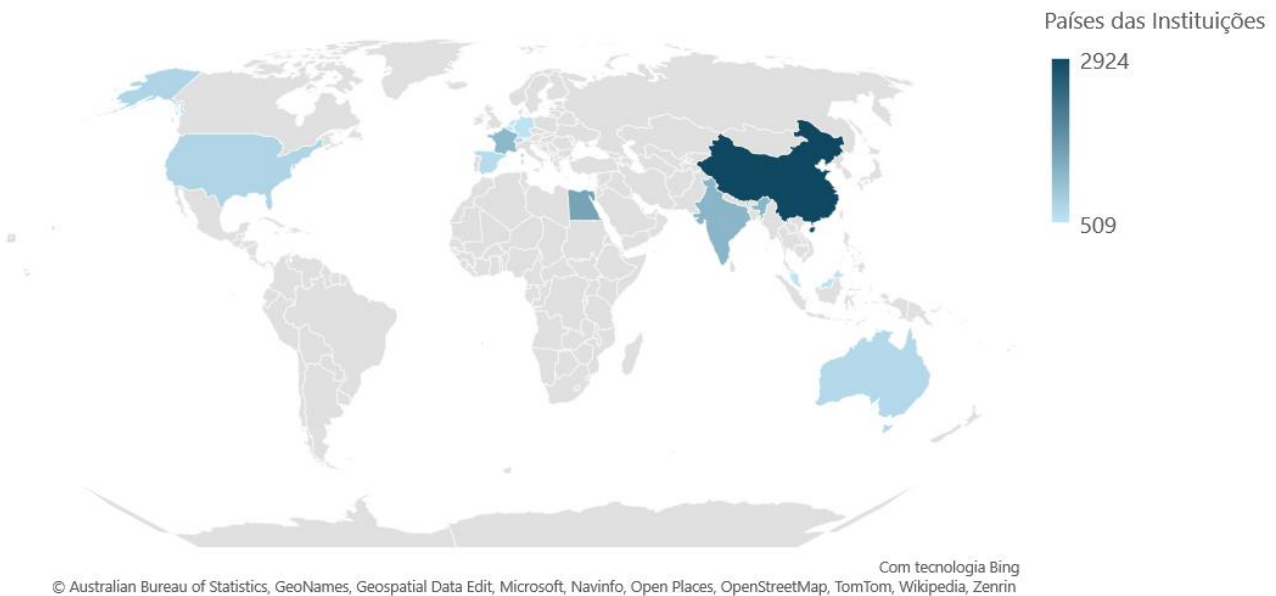


Figura 30 - Países das instituições  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

A Universidade da Madeira, na Região Autónoma da Madeira, Portugal, está creditada em 9 publicações, entre 2020 e 2024, sendo 2022 o ano com maior número de registos, em número de três, conforme aferido na Figura 31.

Refere-se novamente que o presente estudo é elaborado com amostra extraída no início de junho de 2024, pelo que, previsivelmente, os registos relativos ao corrente ano poderão aumentar ao longo do ano.

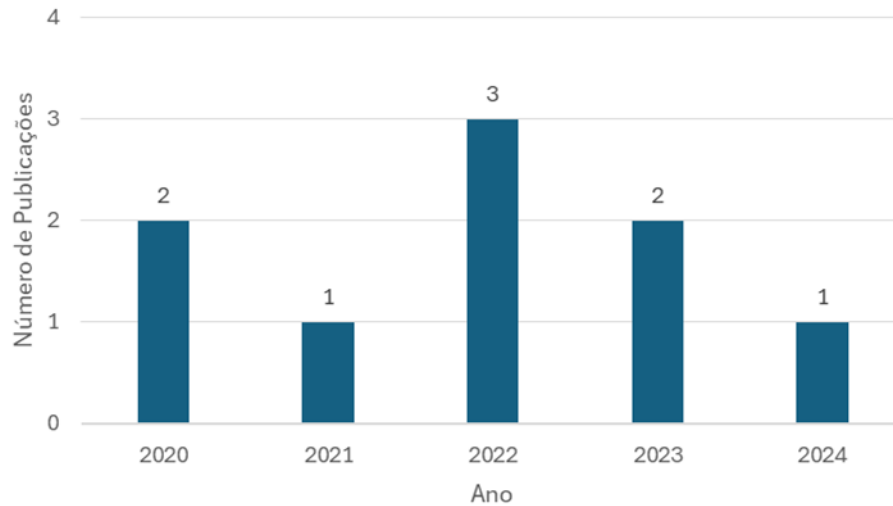


Figura 31 - Publicações da Universidade da Madeira  
Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

### 3.10 PRINCIPAIS REVISTAS

Na Figura 32 observa-se a distribuição da amostra em análise, pelos índices da *Web of Science*, identificado em 2.2, aquando da abordagem à análise bibliométrica.

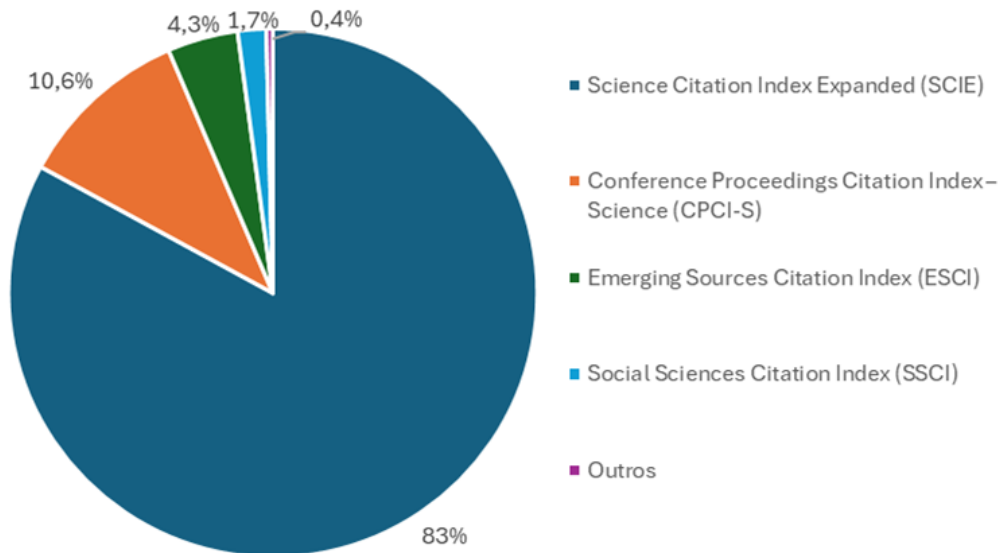


Figura 32 - Índices da *Web of Science*  
Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

Assim e como esperado, verifica-se que 83% das publicações, sendo artigos do tópico tratamento de águas residuais, se incluem no índice primário SCIE, índice das ciências. Conforme apurado em 3.3,

aquando da análise ao tipo de publicação, 11% das mesmas são artigos de conferência, logo incluem-se no índice CPCI-S – *Conference Proceedings Citation Index-Science*, índice dos artigos de conferência na área das ciências, identificado na Figura 10.

No índice ESCI, índice multidisciplinar constam 4,3% das publicações, subsistindo 1,7% noutra índice primário, o SSCI, das ciências sociais. Incide ainda 0,4% sobre outros índices, designadamente o BKCI – *Book Citation Index*, índice das citações em livros, tanto das áreas das ciências como das ciências sociais e humanidades, dado que 1% do tipo de documentos se identificavam como capítulos de livros e documentos em acesso antecipado. Também existem documentos identificados no CPCI da área das ciências sociais e humanidades, além do índice primário das artes e humanidades e do IC - *Index Chemicus* e CCRE - *Current Chemical Reactions*, índice da área da química.

No entanto, para análise qualitativa das principais publicações recorre-se ao JCR, onde estão incluídas, tal como o nome indica, revistas, não se incluindo livros ou artigos de conferência.

Assim, na Figura 33 representam-se as publicações em revistas identificadas conforme o seu índice da *Web of Science*, idêntico ao JCR.

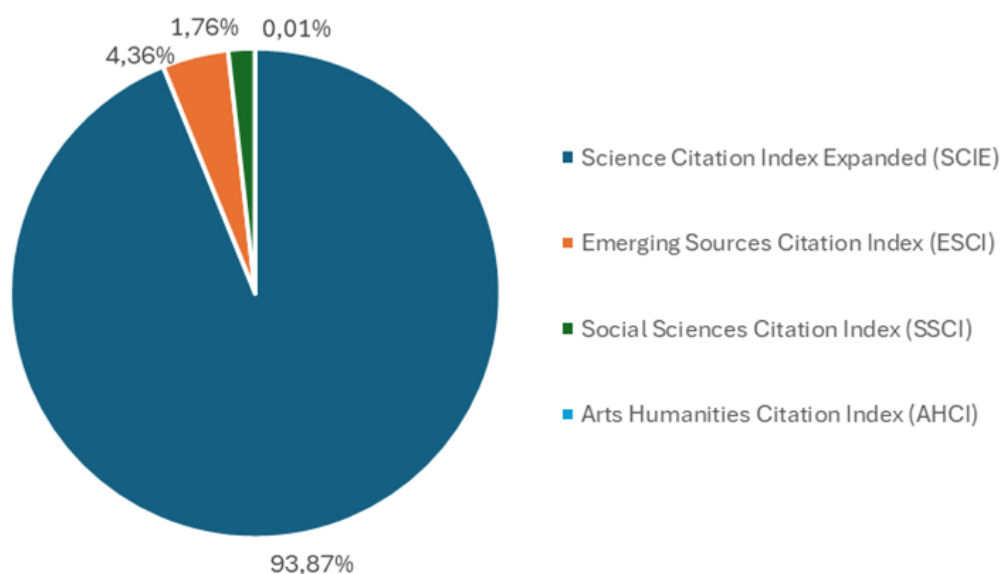


Figura 33 - Índices de revistas na *Web of Science*  
Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

Então, 79 817 artigos estão incluídos no SCIE, representando 93,87% da amostra, 4 164, correspondem a 4,36% no índice ESCI, 1 679 equivalem a 1,76% no SSCI e apenas 14 artigos, a 0,01% no AHCI.

Desta forma, e recorrendo ao filtro Títulos da Publicação, extrai-se uma tabela com o número de artigos publicados por revista, ordenados por ordem decrescente.

Acedendo ao JCR, filtram-se as 25 revistas com mais publicações, após o que se pode personalizar os dados a apresentar. Optou-se por utilizar o fator de impacto, JIF mais recente disponível, o do ano de 2022 e o seu quartil.

Considerando que o JCI é uma métrica normalizada, ao contrário do JIF, este indicador permite a comparação de revistas de áreas de pesquisas diferentes. Assim, além do JCI do ano de 2022 extraiu-se também o seu percentil, além do seu quartil. Complementou-se a pesquisa com o número total de citações no ano de 2022 e com o país de origem da revista.

Conforme referido anteriormente, uma revista pode ser indexada em vários índices, situação que ocorre com 18 das 25 revistas em análise, além do que pode estar presente em mais do que uma categoria por índice.

Do estudo da Tabela 4, elaborada com dados do JCR, retira-se que a revista com mais publicações é a *Water Science and Technology*, com 4 398 artigos, seguida da *Water Research*, com 3 355 artigos, ambas oriundas da Inglaterra. Em terceiro lugar, está a *Science of The Total Environment*, com 3 235 e depois a *Bioresource Technology*, com 2 140 documentos, provenientes dos Países Baixos. Na *Chemosphere*, também de Inglaterra, foram publicados 2 055 artigos e a *Chemical Engineering Journal*, da Suíça detém 2 035 publicações. Estas são as revistas com mais de 2 000 artigos publicados e responsáveis por 18,29% das publicações sobre o tratamento de águas residuais.

Além dos países suprarreferidos, denotam-se evidências de principais publicações com origem em Itália, Alemanha e Estados Unidos da América.

Analisando os principais indicadores das revistas com mais de 3 000 publicações, inicia-se com a revista mais prolifera, *Water Science and Technology*, responsável por 4,67% do total de publicações. Relativamente ao JCI, em 2022, é de 0.43, localizando-se no quartil Q3 e com percentis inferiores a 45, nas categorias que detém. Entre 2018 e 2020, o JCI desta revista situava-se em 0.4, tendo-se reduzido para 0.39 em 2021, evidenciando um aumento em 2022 para 0.43, conforme patente na Figura 34. Apresenta ainda um fator de impacto de 2.7, Q3 e Q2, dependendo da categoria e um total de 25 561 citações.

Tabela 4 - Indicadores das principais revistas

| Nome da Revista                               | Categoria  | País de Publicação        | N.º de Artigos | JCI  |         |           | JIF  |         | Total de Citações |
|---|--|---------------------------|----------------|------|---------|-----------|------|---------|-------------------|
|   |  |                           |                | 2022 | Quartil | Percentil | 2022 | Quartil |                   |
| Water Science and Technology                  | Engineering, Environmental - SCIE                  | Inglaterra                | 4 398          | 0.43 | Q3      | 42.00     | 2.7  | Q3      | 25 561            |
|   | Environmental Sciences - SCIE                      |                           |                |      | Q3      | 28.29     |      | Q3      |                   |
|   | Water Resources - SCIE                             |                           |                |      | Q3      | 31.68     |      | Q2      |                   |
| Water Research                                | Engineering, Environmental - SCIE                  | Inglaterra                | 3 355          | 2.15 | Q1      | 98.00     | 12.8 | Q1      | 144 182           |
|   | Environmental Sciences - SCIE                      |                           |                |      | Q1      | 97.16     |      | Q1      |                   |
|   | Water Resources - SCIE                             |                           |                |      | Q1      | 99.62     |      | Q1      |                   |
| Science of The Total Environment              | Environmental Sciences - SCIE                      | Países Baixos             | 3 235          | 1.68 | Q1      | 94.16     | 9.8  | Q1      | 372 205           |
| Bioresource Technology                        | Agricultural Engineering - SCIE                    | Países Baixos             | 2 140          | 1.79 | Q1      | 97.06     | 11.4 | Q1      | 187 134           |
|   | Biotechnology & Applied Microbiology - SCIE        |                           |                |      | Q1      | 94.38     |      | Q1      |                   |
|   | Energy & Fuels - SCIE                              |                           |                |      | Q1      | 91.94     |      | Q1      |                   |
| Chemosphere                                   | Environmental Sciences - SCIE                      | Inglaterra                | 2 055          | 1.55 | Q1      | 92.07     | 8.8  | Q1      | 190 885           |
| Chemical Engineering Journal                  | Engineering, Chemical - SCIE                       | Suíça                     | 2 035          | 1.99 | Q1      | 96.56     | 15.1 | Q1      | 330 617           |
|   | Engineering, Environmental - SCIE                  |                           |                |      | Q1      | 96.67     |      | Q1      |                   |
| Desalination and Water Treatment              | Engineering, Chemical - SCIE                       | Itália                    | 1 995          | 0.25 | Q3      | 31.56     | 1.1  | Q4      | 19 730            |
|   | Water Resources - SCIE                             |                           |                |      | Q3      | 17.18     |      | Q4      |                   |
| Environmental Science and Pollution Research  | Environmental Sciences - SCIE                      | Alemanha                  | 1 720          | 0.91 | Q2      | 74.10     | 5.8  | Q1      | 144 869           |
| Journal of Hazardous Materials                | Engineering, Environmental - SCIE                  | Países Baixos             | 1 506          | 1.93 | Q1      | 95.33     | 13.6 | Q1      | 208 425           |
|   | Environmental Sciences - SCIE                      |                           |                |      | Q1      | 96.56     |      | Q1      |                   |
| Journal of Environmental Management           | Environmental Sciences - SCIE                      | Inglaterra                | 1 385          | 1.46 | Q1      | 90.57     | 8.7  | Q1      | 99 689            |
| Journal of Water Process Engineering          | Engineering, Chemical - SCIE                       | Países Baixos             | 1 344          | 1.11 | Q1      | 87.19     | 7.0  | Q1      | 17 348            |
|   | Engineering, Environmental - SCIE                  |                           |                |      | Q1      | 83.33     |      | Q2      |                   |
|   | Water Resources - SCIE                             |                           |                |      | Q1      | 85.88     |      | Q1      |                   |
| Environmental Science & Technology            | Engineering, Environmental - SCIE                  | Estados Unidos da América | 1 305          | 1.44 | Q1      | 91.33     | 11.4 | Q1      | 249 799           |
|   | Environmental Sciences - SCIE                      |                           |                |      | Q1      | 89.97     |      | Q1      |                   |
| Journal of Cleaner Production                 | Engineering, Environmental - SCIE                  | Estados Unidos da América | 1 241          | 1.53 | Q1      | 92.67     | 11.1 | Q1      | 295 285           |
|   | Environmental Sciences - SCIE                      |                           |                |      | Q1      | 91.77     |      | Q1      |                   |
|   | Green & Sustainable Science & Technology - SCIE    |                           |                |      | Q1      | 86.31     |      | Q1      |                   |
| Journal of Environmental Chemical Engineering | Engineering, Chemical - SCIE                       | Inglaterra                | 1 239          | 0.94 | Q1      | 80.31     | 7.7  | Q1      | 50 378            |
|   | Engineering, Environmental - SCIE                  |                           |                |      | Q1      | 75.33     |      | Q1      |                   |
| Separation and Purification Technology        | Engineering, Chemical - SCIE                       | Países Baixos             | 1 212          | 1.37 | Q1      | 92.19     | 8.6  | Q1      | 76 726            |
| Water   | Environmental Sciences - SCIE                      | Suíça                     | 1 180          | 0.66 | Q2      | 53.44     | 3.4  | Q2      | 52 504            |
|   | Water Resources - SCIE                             |                           |                |      | Q2      | 57.63     |      | Q2      |                   |
| Environmental Technology                      | Environmental Sciences - SCIE                      | Inglaterra                | 986            | 0.55 | Q3      | 43.26     | 2.8  | Q3      | 12 259            |
| Desalination                                  | Engineering, Chemical - SCIE                       | Países Baixos             | 854            | 1.93 | Q1      | 95.31     | 9.9  | Q1      | 55 616            |
|   | Water Resources - SCIE                             |                           |                |      | Q1      | 98.85     |      | Q1      |                   |
| Water Environment Research                    | Engineering, Environmental - SCIE                  | Estados Unidos da América | 738            | 0.52 | Q3      | 50.00     | 3.1  | Q3      | 5 231             |
|   | Environmental Sciences - SCIE                      |                           |                |      | Q3      | 39.37     |      | Q3      |                   |
|   | Limnology - SCIE                                   |                           |                |      | Q3      | 45.24     |      | Q1      |                   |
|   | Water Resources - SCIE                             |                           |                |      | Q3      | 41.60     |      | Q2      |                   |
| Environmental Pollution                       | Environmental Sciences - SCIE                      | Inglaterra                | 597            | 1.57 | Q1      | 92.66     | 8.9  | Q1      | 126 607           |
| Environmental Research                        | Environmental Sciences - SCIE                      | Estados Unidos da América | 593            | 1.82 | Q1      | 95.66     | 8.3  | Q1      | 58 235            |
|   | Public, Environmental & Occupational Health - SCIE |                           |                |      | Q1      | 94.88     |      | Q1      |                   |
| Journal of Membrane Science                   | Engineering, Chemical - SCIE                       | Países Baixos             | 575            | 1.85 | Q1      | 94.69     | 9.5  | Q1      | 94 219            |
|   | Polymer Science - scie                             |                           |                |      | Q1      | 97.31     |      | Q1      |                   |
| Water Air and Soil Pollution                  | Environmental Sciences - SCIE                      | Países Baixos             | 569            | 0.53 | Q3      | 39.97     | 2.9  | Q3      | 23 846            |
|   | Meteorology & Atmospheric Sciences - SCIE          |                           |                |      | Q3      | 34.09     |      | Q3      |                   |
|   | Water Resources - SCIE                             |                           |                |      | Q3      | 43.13     |      | Q2      |                   |
| Sustainability                                | Environmental Sciences - SCIE                      | Suíça                     | 568            | 0.67 | Q2      | 55.54     | 3.9  | Q2      | 187 953           |
|   | Environmental Studies - SSCI                       |                           |                |      | Q2      | 47.77     |      | Q2      |                   |
|   | Green & Sustainable Science & Technology - SCIE    |                           |                |      | Q2      | 48.21     |      | Q3      |                   |
|   | Green & Sustainable Science & Technology - SSCI    |                           |                |      | Q2      | 48.21     |      | Q3      |                   |
| Ecological Engineering                        | Ecology - SCIE                                     | Países Baixos             | 521            | 0.71 | Q2      | 55.99     | 3.8  | Q2      | 23 129            |
|   | Engineering, Environmental - SCIE                  |                           |                |      | Q2      | 60.67     |      | Q3      |                   |
|   | Environmental Sciences - SCIE                      |                           |                |      | Q2      | 59.13     |      | Q2      |                   |

A segunda revista com mais publicações, *Water Research*, publica 3,56% da amostra, com JCI em 2022 de 2.15, Q1 e percentis superiores a 97 para o JCI, em todas as suas categorias. Pode verificar-se na Figura 35 que o seu JCI em 2018 era 2.07, tendo oscilado entre 2.12 e 2.13 nos anos 2019 a 2021, sendo incrementado para 2.15 em 2022. O fator de impacto é de 12.8 no Q1 em todas as suas categorias, com um total de citações de 144 182.

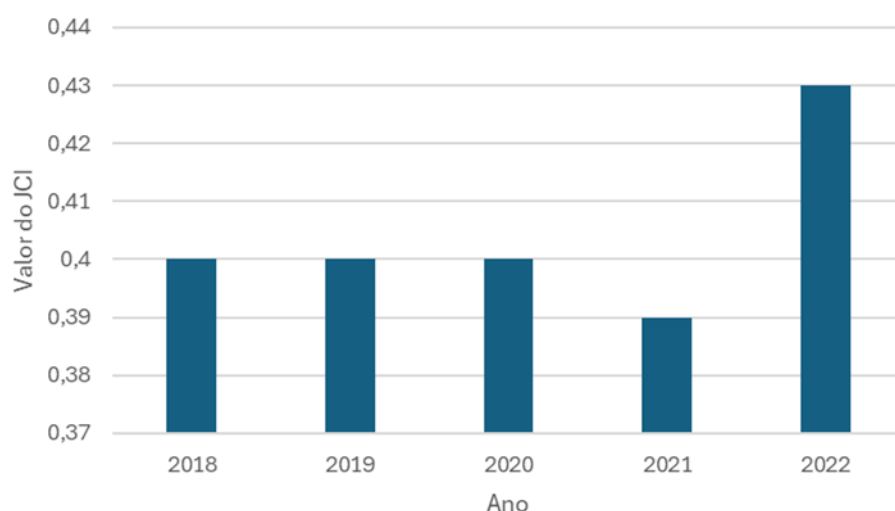


Figura 34 - Evolução do JCI para a revista *Water Science and Technology*

Fonte: Elaboração própria com base no *Journal Citation Reports*

Refere-se que estas duas revistas, ambas de Inglaterra, estão presentes nas categorias Engenharia Ambiental, Ciências Ambientais e Recursos Hídricos, todas do índice SCIE, índice das ciências. Apesar da revista *Water Research*, ser a segunda escolhida para publicar é a que ostenta melhor JCI, com citações superiores ao dobro da média das categorias e citações na ordem da centena de milhar, comparativamente à *Water Science and Technology* que tem um JCI de 0.43, ou seja, com citações inferiores a metade da média e apenas 25 561 citações.

A terceira revista com mais de 3 000 publicações é a *Science of The Total Environment*, proveniente dos Países Baixos, com 3,44% da amostra. Esta revista está apenas na categoria de Ciências Ambientais, sendo o seu JCI em 2022 de 1.68, quartil Q1 e percentil 94.16. Esta revista viu o seu JCI aumentar gradualmente entre 2018 e 2021, de 1.49 para 1.77, tendo-se reduzido em 2022 para 1.68, conforme Figura 36. O seu fator de impacto é de 9.8, quartil Q1 e 372 205 citações em 2022.

Verifica-se na Tabela 4 que o quartil do JCI é mais uniforme, ou seja, apesar das revistas deterem mais do que uma categoria, o seu quartil é o mesmo em todas as categorias.

As revistas nas posições 4 a 25 da Tabela 4 publicam 28% da amostra em análise, sendo que existem 14 revistas no Q1 do JCI, designadamente: *Bioresource Technology*, *Chemosphere*, *Chemical Engineering Journal*, *Journal of Hazardous Materials*, *Journal of Environmental Management*, *Journal*

*of Water Process Engineering, Environmental Science & Technology, Journal of Cleaner Production, Journal of Environmental Chemical Engineering, Separation and Purification Technology, Desalination, Environmental Pollution, Environmental Research e Journal of Membrane Science.*

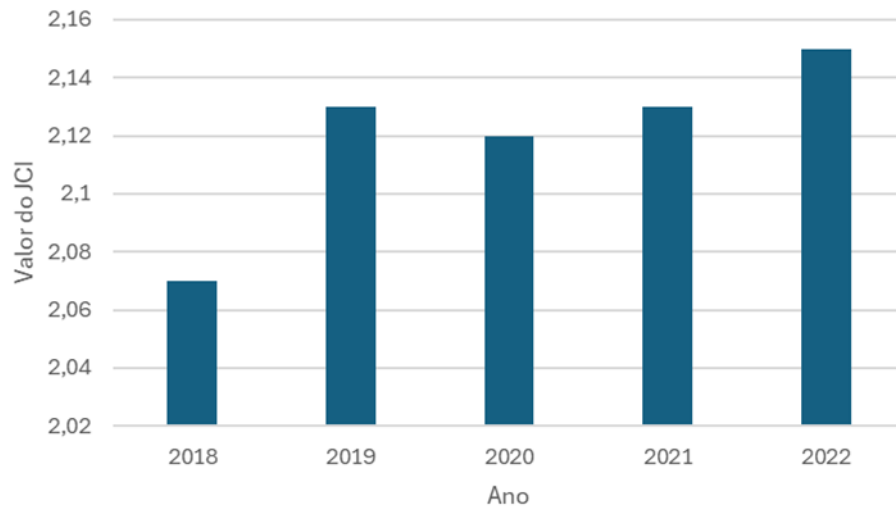


Figura 35 - Evolução do JCI para a revista *Water Research*  
 Fonte: Elaboração própria com base no *Journal Citation Reports*

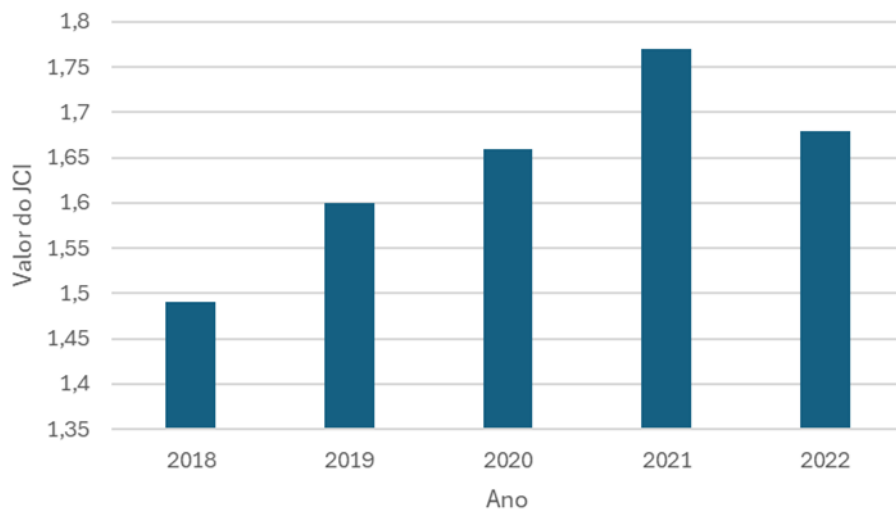


Figura 36 - Evolução do JCI para a revista *Science of The Total Environment*  
 Fonte: Elaboração própria com base no *Journal Citation Reports*

Com Q2 do JCI estão 4 revistas: *Environmetal Science and Pollution Research, Water, Sustainability e Ecological Engineering.*

No Q3 do JCI estão também 4 revistas: *Desalination and Water Treatment, Environmental Technology, Water Environment Research, Water Air and Soil Pollution.*

### 3.11 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são objetivos globais assumidos pelos 193 países das Nações Unidas, em 2015, entrando em vigor em 2016, através da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e definem “prioridades e aspirações do desenvolvimento sustentável global para 2030”. São em número de 17 e são um “apelo urgente à ação de todos países – desenvolvidos e em desenvolvimento – para a parceria global.” Estes objetivos “têm como ambição “não deixar ninguém para trás””, estabelecendo uma linguagem clara para todos os intervenientes, fixando metas de sustentabilidade, centradas em áreas essenciais para a humanidade, “em torno de 5 Princípios: Planeta, Pessoas, Prosperidade, Paz e Parcerias.” (Business Council for Sustainable Development (BCSD) Portugal, 2024).

Ban Ki-moon (antigo Secretário-Geral das Nações Unidas) declara que “Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são a nossa visão comum para a Humanidade e um contrato social entre os líderes mundiais e os povos. São uma lista das coisas a fazer em nome dos povos e do planeta e um plano para o sucesso. (Business Council for Sustainable Development (BCSD) Portugal, 2024).

A *Web of Science* dispõe do filtro Objetivos de Desenvolvimento Sustentável que identifica em que objetivo se inclui os documentos da base de dados. Aplicando este filtro à amostra em análise é possível extrair listagem a partir da qual se elaborou o gráfico da Figura 37.

Refere-se que 10,5% dos documentos em estudo ainda não possuem esta referência. Ainda assim, pareceu relevante analisar em que objetivos se enquadram os documentos sobre o tratamento de águas residuais.

Verifica-se que 65,6% dos documentos são indicados no objetivo 06, Água Potável e Saneamento, seguido do objetivo 11, Cidades e Comunidades Sustentáveis com 10,2%, do objetivo 03, Saúde de Qualidade, com 8,2%, do objetivo 12, Produção e Consumo Sustentáveis com 6,1% e do objetivo 13, Ação Climática com 3,2%. Todos os demais objetivos possuem referências inferiores a 1,7%, não estando o objetivo 17, Parcerias para a Implementação dos Objetivos identificado em nenhum documento.

O objetivo identificado em maior número de documentos, 06 Água Potável e Saneamento, pretende “Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos.” (tradução de United Nations, 2024). Na sua descrição, pode ler-se que a água e o saneamento são o cerne do desenvolvimento sustentável, apesar de nas últimas décadas “a sobreexploração, a poluição e as alterações climáticas levaram a um grave stress hídrico em diversos locais do mundo.” (tradução de United Nations, 2024).

Atualmente 2,2 milhões de pessoas não têm acesso à gestão segura da água potável e mais de 4,2 milhões não têm acesso à gestão segura do saneamento. As alterações climáticas com cada vez maior

ocorrência de inundações e secas, agravam ainda mais a situação. 80% das águas residuais retornam ao ecossistema sem tratamento ou reutilização e perdeu-se 70% das zonas húmidas mundiais, (United Nations, 2024).

É então essencial alterar a gestão de recursos hídricos e o fornecimento de água potável e saneamento a milhares de milhões de pessoas em todo o mundo. Para superar esta crise global que afeta todos os países, social, económica e ambientalmente é necessária uma ação urgente, (United Nations, 2024).

Considerando a elevada percentagem de documentos relacionados com este objetivo sustentável, é incontestável o interesse da comunidade académica na investigação sobre o tema do tratamento de águas residuais.

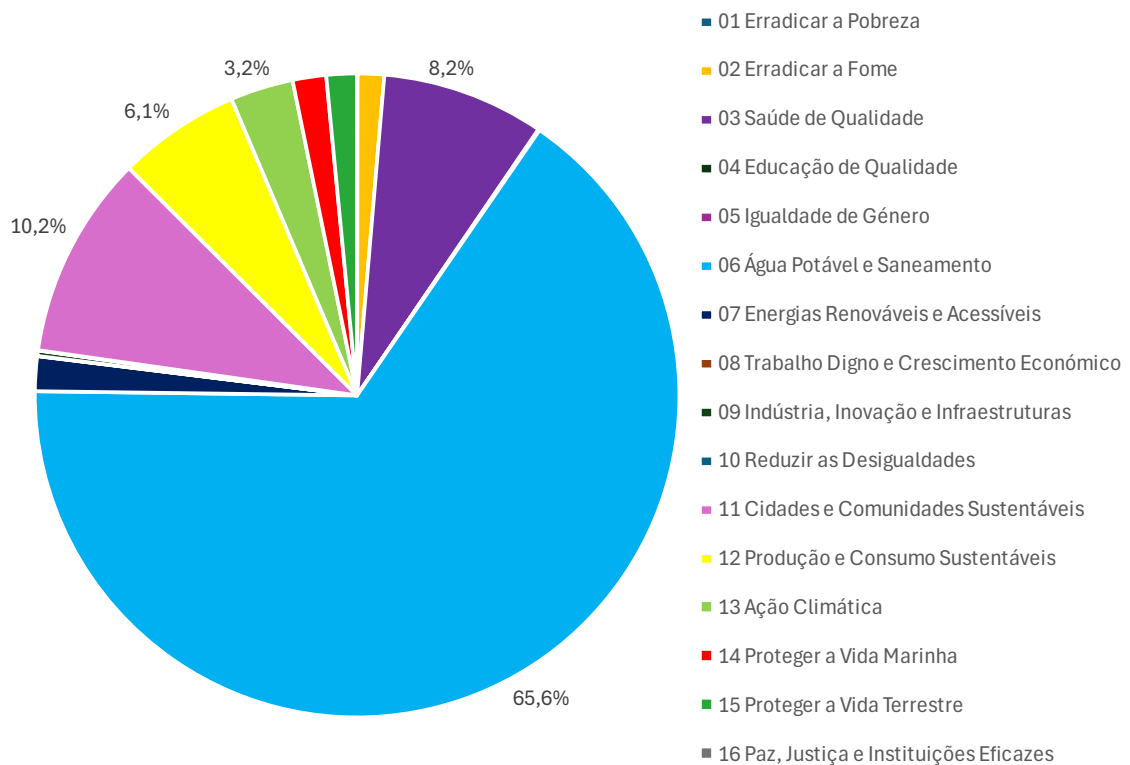


Figura 37 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

### 3.12 ANÁLISE ADICIONAL

A análise adicional incide sobre o tratamento das águas residuais destinadas à reutilização, por estes tratamentos serem, por várias razões económicas e ambientais, as opções mais utilizadas para desinfecção de água, (Gómez-López, 2009).

Esta análise ocorre sobre os 737 documentos relevantes sobre o tratamento por cloração e os 5 724 documentos sobre o tratamento por ultravioleta para os parâmetros evolução e países. Para a análise sobre co-ocorrência de palavras-chave e colaboração internacional será utilizada a amostra reduzida de 24 e 178 documentos para o tratamento por cloração e por ultravioleta, respetivamente.

### 3.12.1 Evolução anual publicações

Para a evolução anual de publicações recorre-se à opção Analisar resultados e ao filtro Anos de Publicação para cada uma das pesquisas sobre o tema do tratamento por cloração e por ultravioleta, após o que se elaborou o gráfico da Figura 38.

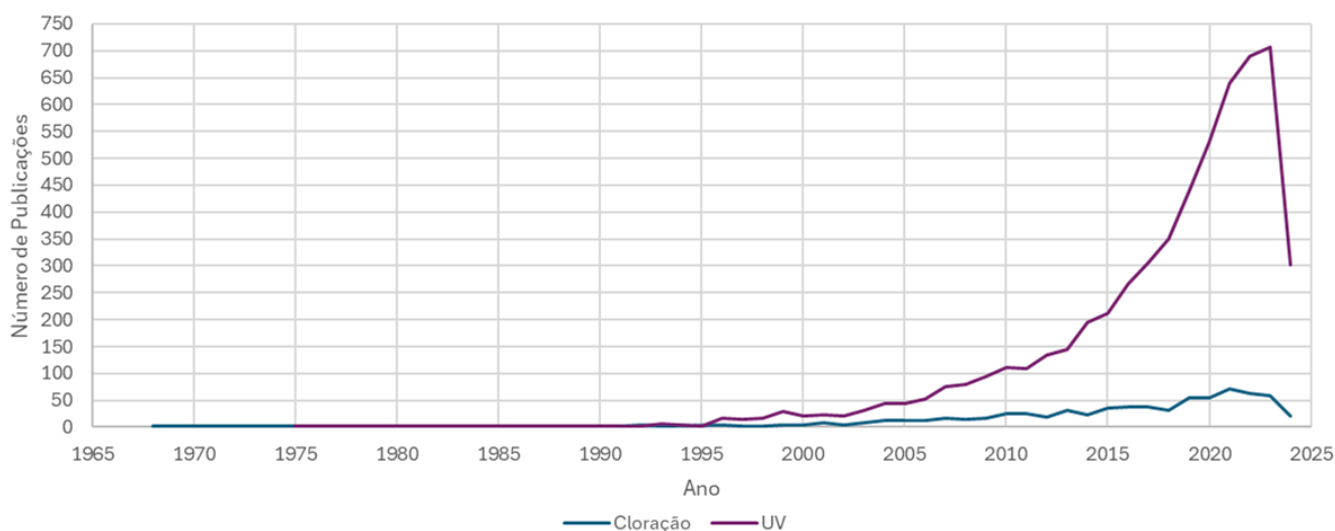


Figura 38 - Publicações por ano  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

Apesar do período de pesquisa se centrar entre os anos de 1950 e 2024, o primeiro documento com o tópico cloração foi publicado em 1968, tendo ultrapassado a dezena de publicações em 2004, com 12 documentos, atingindo 25 publicações em 2010, tendo vindo a subir gradualmente desde 2015, com 35 publicações até 2022 onde obteve o máximo de 63 publicações. Em 2023, o número reduziu para 59, sendo que no corrente ano e até meados de junho de 2024, ocorrem 21 registos, quantia que previsivelmente aumentará até final deste ano.

No tópico do tratamento por ultravioleta, o primeiro documento foi publicado em 1975, ultrapassando uma dezena em 1996, com 17 registos, apresentando algumas flutuações até 2003, com 32 publicações, após o que aumenta sucessivamente até o seu máximo de 2023, com 707 documentos. Em 2024, regista 303 publicações, apesar de, como já referido, se prever o aumento deste número até o final do ano.

Verifica-se que, embora as publicações sobre o tópico tratamento por ultravioleta terem se iniciado posteriormente ao tratamento por cloração, e ambas se mantiverem reduzidas até 1995, a partir de 1996, quando a cloração apenas conta com 5 publicações e o ultravioleta com 17, os números começam a distanciar-se, sendo que em 2010 o ultravioleta ultrapassa a centena, com 112 documentos mantendo-se a tendência até ao ano de 2023.

Assim, é explícito o incremento de interesse da comunidade investigadora uma vez que até 2010 se publicaram 174 documentos sobre o tema cloração, correspondendo a 23,61% do total, tendo-se publicado posteriormente 563 documentos, relativos aos restantes 76,39%.

Sobre o tema do tratamento por ultravioleta, publicaram-se até 2010, 697 documentos, 12,18% do total, e posteriormente 5 027 publicações, correspondendo a 87,82% da amostra.

Observa-se ainda que os 737 documentos sobre tratamento por cloração e os 5 724 sobre o tratamento por ultravioleta equivalem a 0,82% e 6,35% respetivamente, da pesquisa sobre tratamento de águas residuais.

### 3.12.2 Principais países

Relativamente aos países com publicações sobre o tópico cloração, estão identificados 71 países, conforme constatado na Figura 39, com registos a variar entre 1 e 225 publicações. Existem 14 países com apenas 1 publicação, 37 com 2 a 9 e 20 países com mais de 10 publicações.

Assim, os 20 principais países, com mais de uma dezena de publicações estão identificados na Figura 40. Verifica-se que o país com mais publicações é a China com 225 registos, correspondendo a 30,5% do total, seguida dos Estados Unidos da América com 197 publicações, 26,7%, da Espanha com 43 publicações e 5,8% da amostra. Segue-se o Japão, com 35 registos, a Itália, com 32, a Austrália com 27, o Canadá com 25, o Brasil com 24, a Grécia com 23 e a Índia com 21. As publicações destes 10 países representam 88,5% do total desta amostra.

De forma análoga, os países com publicações sobre o tema do tratamento por ultravioleta são em número de 109, conforme se observa na Figura 41, aumentando de 1 registo, em 11 países, até 1 618 registos para a China. Existem 30 países com 2 a 9 artigos e 47 países entre uma dezena e uma centena de publicações.

Os 21 países com mais de uma centena de publicações, estão identificados no gráfico da Figura 42.

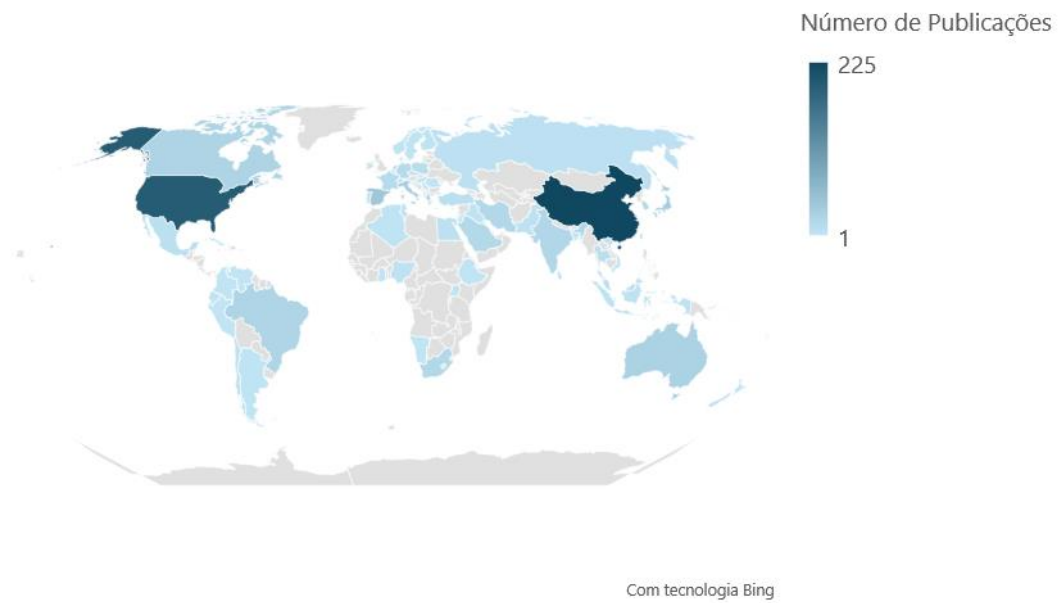


Figura 39 - Países das publicações sobre o tema cloração  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

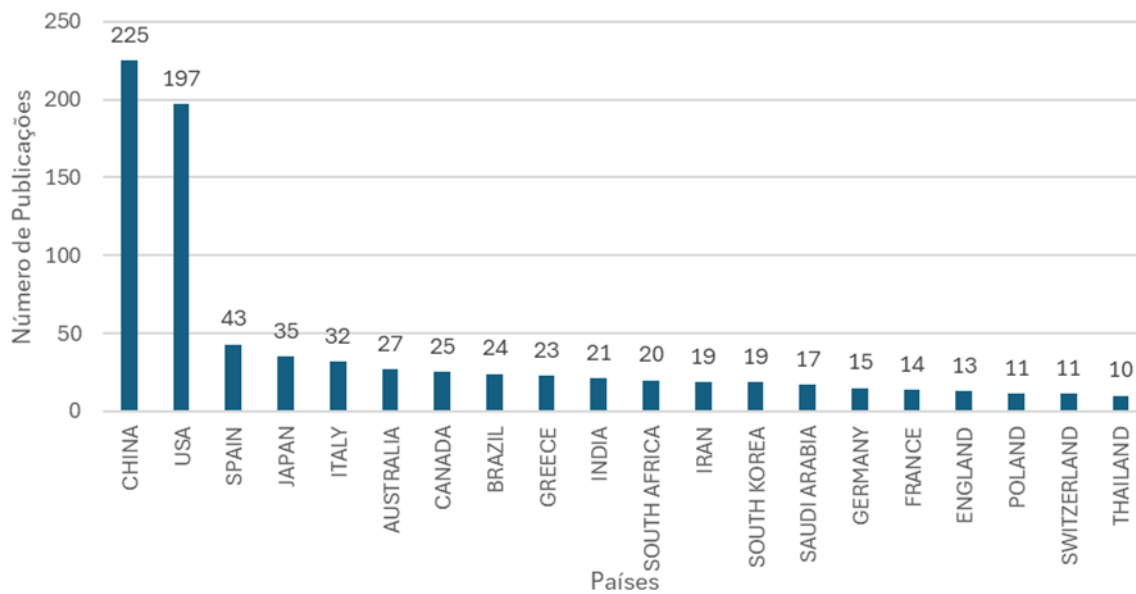


Figura 40 - Países com mais de 10 publicações sobre o tema cloração  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

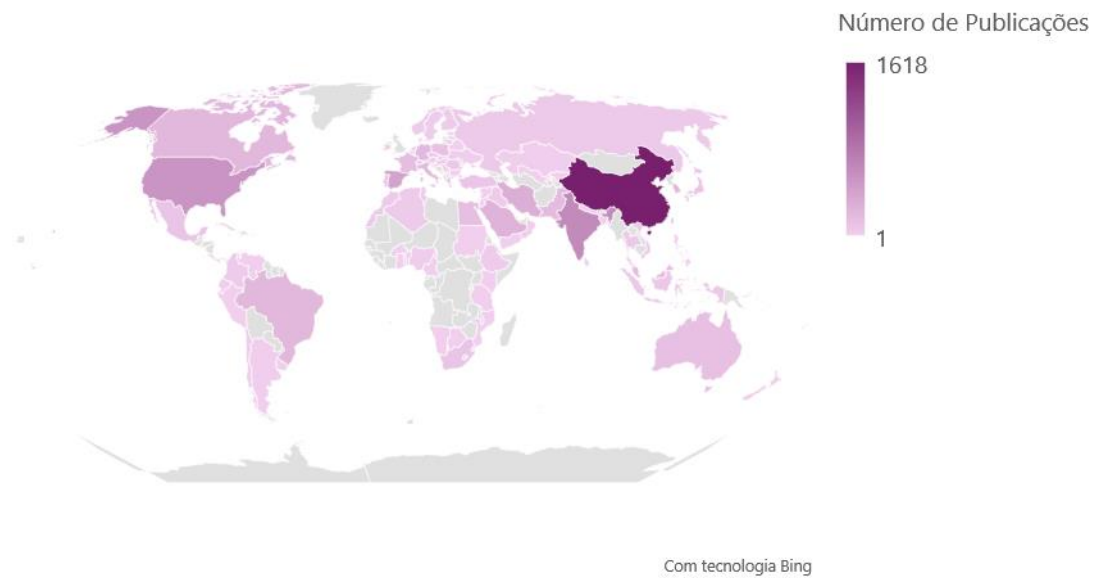


Figura 41 - Países das publicações sobre o tema ultravioleta  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

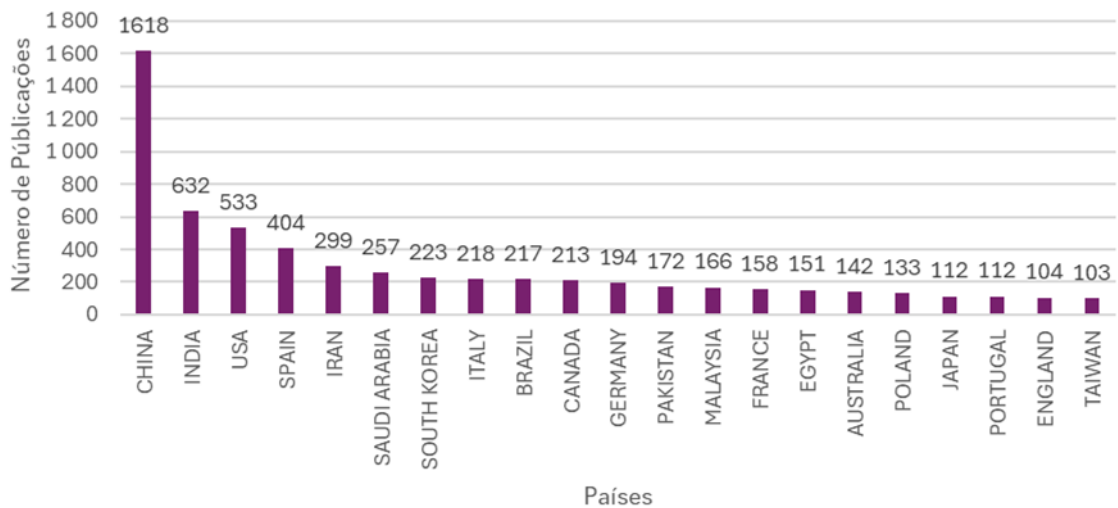


Figura 42 - Países com mais de 100 publicações sobre o tema ultravioleta  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

Assim, o país com mais publicações é a China, com 1 618 registos, 28,3% do total, seguido da Índia, com 632 documentos, 11% e dos Estados Unidos da América com 533 publicações e 9,3% da amostra. Sucessivamente, está a Espanha com 404 registos, o Irão com 299, a Arábia Saudita com 257, a Coreia do Sul com 233, a Itália com 218, o Brasil com 217 e o Canadá com 213. Estes 10 países, com mais de duzentos documentos, são responsáveis por 80,6% das publicações.

Comparando os 10 países com mais publicações em ambos os tópicos desta análise adicional, verifica-se na Figura 43 a sua distribuição.

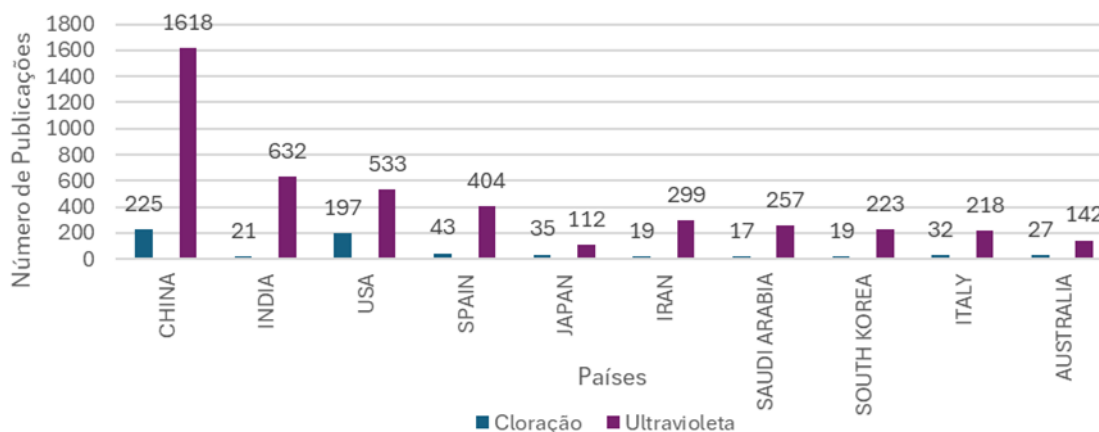


Figura 43 - Países com mais publicações sobre os temas tratamento por cloração e por ultravioleta  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

Assim, observa-se que em ambos os casos, assim como sobre o tratamento de águas residuais, o país mais produtivo é a China. A Índia, apesar de ser o segundo país com mais publicações sobre o tratamento por ultravioleta, está na 10.<sup>a</sup> posição relativamente às publicações com o tópico cloração. Os Estados Unidos da América e a Espanha têm posições consecutivas em ambos os tópicos, sendo que o Japão, apesar de ser o 4.<sup>o</sup> país com mais publicações sobre cloração, está na posição 18.<sup>o</sup> no tratamento sobre ultravioleta. O Irão, Arábia Saudita e a Coreia do Sul, nas posições 5.<sup>a</sup> a 7.<sup>a</sup> do tratamento por ultravioleta estão abaixo da 10.<sup>a</sup> posição, na cloração, 12.<sup>a</sup>, 14.<sup>a</sup> e 13.<sup>a</sup> respetivamente. A Itália está na 5.<sup>a</sup> posição para a cloração e na 8.<sup>a</sup> para o ultravioleta, contando a Austrália com a 6.<sup>a</sup> posição na cloração e a 16.<sup>a</sup> no ultravioleta.

Nota-se que apesar de ocuparem posições diferentes no número de publicações, estão sempre nos lugares cimeiros, pelo que os principais países a trabalhar sobre os tópicos do tratamento de águas residuais destinada à reutilização, por cloração e por ultravioleta, são os mesmos.

Na Figura 44 observam-se as publicações com origem em Portugal. Sobre o tópico da cloração contam-se 5 publicações entre os anos de 2016 e 2023, 1 por ano em 2016, 2019 e 2023 e 2 em 2020.

Relativamente ao tratamento por ultravioleta, Portugal é mais prolífero registando 122 publicações entre os anos de 2004 e 2024. Entre 2004 e 2017, o crescimento foi reduzido, inferior à dezena de documentos, tendo registado aumento entre 2018 e 2022, das 11 para o número máximo de 15 publicações anuais. Verifica-se uma redução para 8 documentos em 2023 e apenas 3 documento até meados de junho de 2024, número que se equaciona dilatar até final do corrente ano.

Com referência à Universidade da Madeira, esta instituição não está identificada em nenhuma publicação do tópico cloração, registando 1 documento em 2023 sobre o tratamento por ultravioleta.

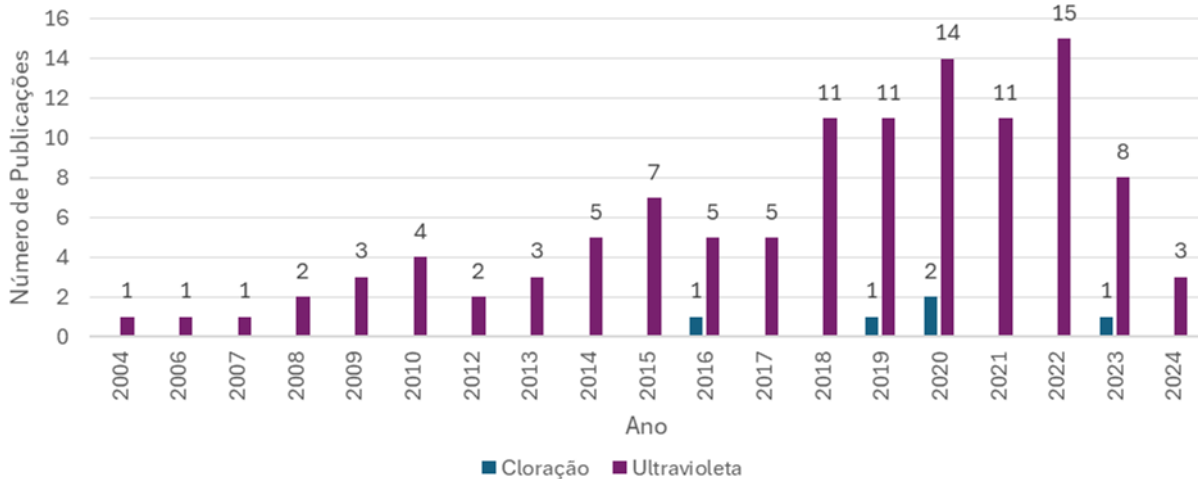


Figura 44 - Publicações de Portugal  
 Fonte: Elaboração própria com base na *Web of Science*

### 3.12.3 Co-ocorrência de palavras-chave

Recorrendo ao *VOSviewer*, nos mesmos termos que para o tratamento de águas residuais, replica-se para o tratamento por cloração. Utilizando a amostra de 24 documentos recolhidos sobre este tópico, são identificadas 216 palavras-chave, sendo que para o mínimo de 3 ocorrências existem 15 palavras-chave, agrupadas em 3 conjuntos, representados na Figura 45.

Como esperado, a palavra-chave com maior número de ocorrências, em número de 11, é cloração também com a maior ligação às restantes, somando 30 ligações.

Assim, o conjunto vermelho é composto por 7 palavras-chave: oxidação avançada, processos de oxidação avançada, degradação, micropoluentes, produtos farmacêuticos, efluente secundário e tratamento de águas residuais. Estas palavras-chave ocorrem 3 e 4 vezes, mas têm entre 5 e 14 ligações.

O conjunto verde, onde se inclui a palavra cloração, além de subprodutos de desinfecção, ozonização e águas residuais registam 3 a 11 ocorrências e entre 12 e 30 ligações.

O conjunto azul, constituído pelas palavras água potável, ácidos haloacéticos, matéria orgânica natural e toxicidade, que ocorrem entre 3 e 6 vezes, mas registam 6 a 20 ligações com as demais.

Para a amostra de 178 documentos sobre o tópico de tratamento por ultravioleta, registam-se 1 135 palavras-chave, pelo que optou por alterar o número mínimo de ocorrências, aumentando de 3 para 10, de forma que fosse possível analisar as 37 palavras que cumprem as 10 ocorrências, em vez das 162 que cumpriam as 3 ocorrências, inviabilizando a análise. Esta rede está representada na Figura 46.

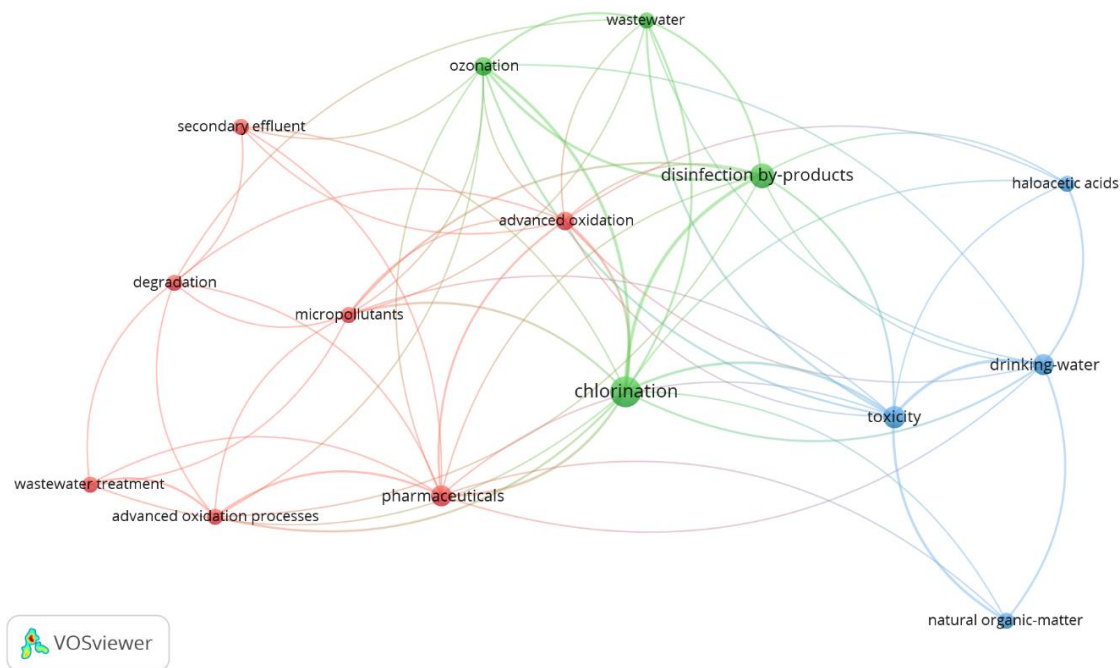


Figura 45 - Cloração: Co-ocorrência de palavras-chave  
 Fonte: Elaboração no *VOSviewer*

O maior conjunto é representado a vermelho e conta com 14 itens: oxidação avançada, processo de oxidação avançada, desinfecção, água potável, *escherichia-coli*, peróxido de hidrogénio, cinética, micropoluentes, ozonização, ozono, produtos farmacêuticos, toxicidade, uv e água residual. Estas palavras-chave têm entre 10 a 25 ocorrências e 43 a 107 ligações.

O conjunto verde tem 12 palavras-chave: absorção, solução aquosa, degradação, contaminantes emergentes, radicais hidroxila, azul de metileno, oxidação, persulfato, degradação fotocatalítica, tratamento de água residual, tratamento de águas residuais e água, com ocorrências entre 10 e 52 vezes e 36 a 221 ligações.

O conjunto azul conta com 11 palavras-chave: ácido, processos de oxidação avançados, coagulação, eletro-*fenton*, oxidação eletroquímica, *fenton*, otimização, foto-*fenton*, fotocatalise, remoção e água residual, com 10 a 56 ocorrências e 36 a 220 ligações a outros itens.

Observando a Figura 46 nota-se que o maior item é remoção no conjunto azul e com 56 ocorrências, seguido de degradação e tratamento de águas residuais, a verde, com 52 e 50 ocorrências respetivamente.

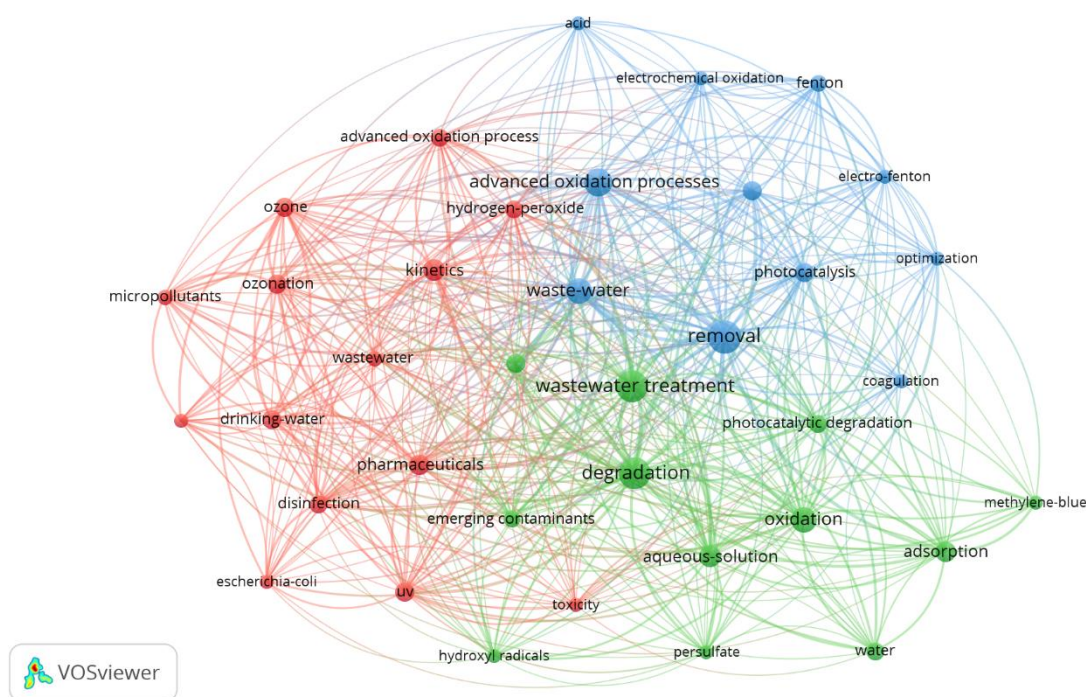


Figura 46 - Ultravioleta: Co-ocorrência de palavras-chave  
Fonte: Elaboração no *VOSviewer*

#### 3.12.4 Colaboração internacional

Para a colaboração internacional elaborou-se uma análise de co-autoria para os países identificados na amostra de 24 documentos sobre o tópico da cloração. Considerando o registo mínimo de 1 documento e 0 citações para cada país, todos os 16 países cumprem os requisitos, apesar de apenas 14 estarem ligados.

Os 14 países são agrupados em 5 conjuntos. A vermelho está a Inglaterra, os Países Baixos, a China, a Suíça e os Estados Unidos da América. Neste conjunto estão os 2 países com maior número de documentos: Os Estados Unidos da América estão identificados em 11 artigos, com 705 citações e a China com 6 publicações, que obtiveram 178 citações. A Inglaterra e a Suíça têm 1 documento cada, com 82 e 15 citações respetivamente e os Países Baixos têm 2 documentos com 38 citações.

No segundo conjunto, a verde, está representado o Chile, a Suécia e a Espanha sendo que os 2 primeiros países têm 1 documento cada, com 6 e 5 citações respetivamente e a Espanha tem 4 documentos com 158 citações.

Os Estados Unidos da América partilham com a Espanha o maior número de ligações, com 7 ligações aos demais países.

### Capítulo III

Os três restantes conjuntos são compostos de 2 itens cada: A azul, a Austrália e a França, com 3 e 1 documentos e 191 e 32 citações, respetivamente; a amarelo, o Canadá e a Alemanha, com 1 documento com 44 citações e a roxo a Itália e a Irlanda do Norte, com 2 e 1 documento com 133 e 103 citações, respetivamente.



Figura 47 - Cloração: Colaboração internacional  
Fonte: Elaboração no *VOSviewer*

Replicando para o tratamento por ultravioleta, na sua amostra de 178 documentos, são identificados 58 países, onde 42 têm ligação, ficando agrupados em 10 conjuntos.

Assim, o conjunto com mais elementos, 10 itens a vermelho, é composto pela Argentina, Áustria, Chipre, Itália, Irlanda do Norte, Noruega, Portugal, Espanha, Suíça e Vietname, com registo de 2 a 31 documentos e 28 a 1 438 citações, sendo a Espanha que detém o número mais elevado de documentos, citações e 29 ligações aos restantes países.

O conjunto verde, com 6 elementos, Botsuana, Inglaterra, Irão, Israel, África do Sul e Coreia do Sul, regista entre 1 e 7 documentos. A Inglaterra e o Irão, países com 7 documentos garantem 666 e 237 citações cada.

A azul está a Argélia, Cuba, França, Singapura e Suécia, com 1 a 13 documentos e 17 a 452 citações, sendo os maiores números ostentados pelos documentos de origem francesa.

A amarelo está a Austrália, o Japão, a China, a Arabia Saudita e os Emirados Árabes Unidos, com 1 a 38 documentos e 11 a 1141 citações para a China, sendo também este país que apresenta o maior número de ligações, com 32 ligações aos restantes países.

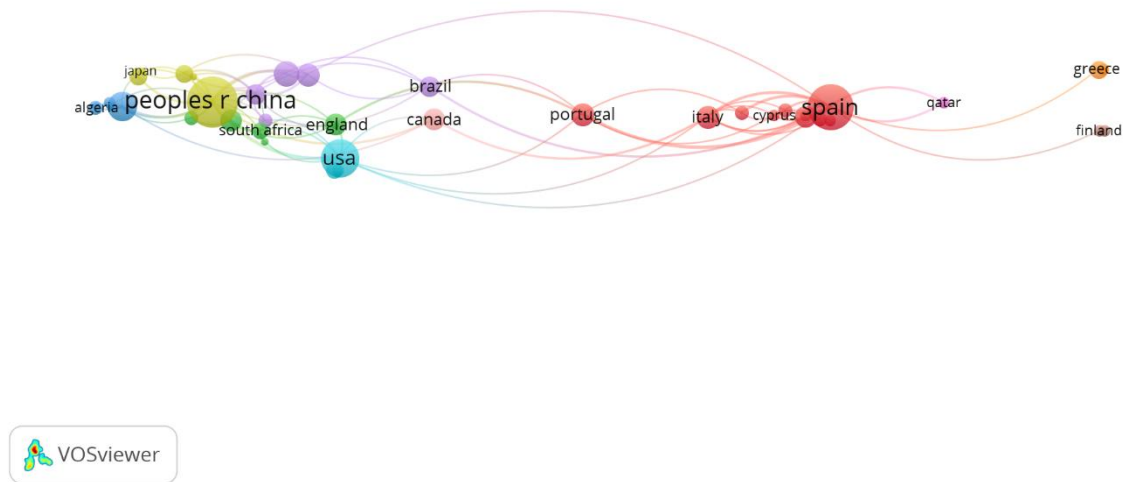


Figura 48 - Ultravioleta: Colaboração internacional  
 Fonte: Elaboração no VOSviewer

A roxo está o Brasil, a Índia, os Países Baixos, o Paquistão e a Polónia, com 3 a 10 documentos e 64 a 770 citações, tendo a Polónia maior representatividade em documentos e citações.

A ciano está a Colômbia, a República Checa, o México e os Estados Unidos da América, com 1 a 21 documentos e 203 a 1022 citações, sendo os estadunidenses os mais prolíficos.

A Grécia e a Escócia são representadas a laranja, com 2 e 5 documentos e 72 e 312 citações para os mesmos. A castanho está a Finlândia e o Quênia, com 2 documentos cada e 95 e 97 citações. O Catar e a Tunísia têm 2 documentos com 48 citações e o Canadá apresenta 7 documentos com 132 citações e 6 ligações aos demais países.

### 3.13 COMPÊNDIO DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Como conclusões da análise bibliométrica constata-se o aumento do interesse da comunidade acadêmica no tema do tratamento de águas residuais, revelado pelo aumento acentuado de publicações nos últimos 10 anos, maioritariamente sobre a forma de artigos relacionados com as áreas do ambiente e ciências. Estas publicações são oriundas dos 5 continentes, sendo que, os 3 países com maior número de publicações são a China, os Estados Unidos da América e a Índia, que são, os países mais populosos em 2024, apesar de não ser correspondente à ordem apresentada. As publicações são predominantemente produzidas em inglês, sendo este o dialeto mais utilizado a nível científico e académico.

O artigo mais citado de Crini & Lichtfouse é um artigo de fácil consulta e manuseio podendo até ser utilizado como manual para consulta e esclarecimento de dúvidas relacionadas às vantagens e

### Capítulo III

desvantagens dos vários tipos de tratamento de águas residuais. As principais instituições estão localizadas na China e no Egito e as principais revistas são oriundas de Inglaterra. De referir que a revista com o 2.º maior número de publicações, *Water Research*, é a que detém melhor valor do JCI, 2.15, estando situada no Q1 do JCI em todas as categorias das ciências em que se inclui e com percentis, também do JCI, superiores a 97.

Relativamente aos objetivos de desenvolvimento sustentável, a maioria dos artigos estão identificados no objetivo 06 Água Potável e Saneamento o que revela o interesse da comunidade científica em providir e melhorar o tratamento de águas residuais a toda a população mundial.

No que se refere à análise adicional, também se revela um aumento do interesse da comunidade académica nos tratamentos por cloração e ultravioleta, sendo a China o país com mais publicações em ambos os temas.

## CAPÍTULO 4: REVISÃO DA LITERATURA

## 4.1 INTRODUÇÃO

Uma revisão conforme define o Dicionário Priberam da Língua Portuguesa é um “novo exame, nova leitura”, neste caso sobre a pesquisa científica existente sobre o tema em estudo.

Grant & Both (2009) identificam 14 tipos de revisão da literatura e as suas metodologias associadas, com base nos critérios SALSA: Search (tipo de pesquisa), Appraisal (qualidade da pesquisa), Synthesis (resumo da pesquisa) e Analysis (análise da pesquisa).

De entre os 14 tipos identificados, o presente trabalho enquadra-se melhor numa *overview* ou visão geral, como o próprio título indica. Grant & Both (2009) descrevem uma visão geral como um resumo da literatura existente relatando as suas características. O tipo e qualidade da pesquisa e sua sistematização estão bem explanados nos capítulos anteriores, sendo que se procedeu a um resumo, que terá a forma narrativa, e será organizado e analisado conforme os tópicos *Citation Topics Micro*, disponibilizados na base de dados *Web of Science*.

Grant & Both (2009) identificam como ponto forte de uma revisão do tipo visão geral o benefício que os interessados em conhecer o tema terão ao aceder a um resumo amplo e abrangente que permitirá enquadrar e desenvolver as suas próprias verificações e investigações. Como desvantagem, os autores referem a possível falta de métodos sistemáticos e relatórios detalhados, lacuna que se pretendeu colmatar com a exposição detalhada da pesquisa relatada nos capítulos anteriores.

Refere-se que, da amostra de 272 documentos, sobre o tema tratamento de águas residuais, apesar de se ter aplicado o filtro Acesso Aberto, permaneceram 15 documentos a que não foi possível aceder devido à instituição de ensino da autora não deter protocolo com as editoras, facto que reduz a amostra a 257 documentos. Sendo que 1 documento foi objeto de retratação da publicação, o mesmo foi excluído. Assim, o resumo incide sobre 256 documentos.

Tabela 5 - Número de documentos por tópico e amostra

| Tópico           | Amostra                             |              |                   |                            |
|------------------|-------------------------------------|--------------|-------------------|----------------------------|
|                  | Tratamento de águas residuais (TAR) | TAR/Cloração | TAR/ Ultravioleta | TAR/Cloração/ Ultravioleta |
| Absorção         | 83                                  |              | 1                 |                            |
| Eletrocoagulação | 95                                  | 2            | 18                | 1                          |
| Floculação       | 43                                  |              | 2                 |                            |
| Hidrodecloração  | 5                                   |              |                   |                            |
| Cloração         |                                     | 2            |                   |                            |
| Ultravioleta     |                                     |              | 4                 |                            |
| <b>Subtotal</b>  | <b>226</b>                          | <b>4</b>     | <b>25</b>         | <b>1</b>                   |
| <b>Total</b>     | <b>256</b>                          |              |                   |                            |

Fonte: Elaboração própria

Pode observar-se na Tabela 5 os 256 documentos sobre o tema do tratamento de águas residuais distribuídos nos micro tópicos definidos na *Web of Science*, referindo-se que uma análise detalhada revelou a necessidade de melhor enquadrar alguns documentos nos doravante denominados tópicos. Também se verifica que desses 256 documentos, 4 e 25 se incluem também na amostra do tratamento por cloração e por ultravioleta, respetivamente. Apenas 1 documento, afeto ao tópico eletrocoagulação é comum às amostras dos três temas em estudo.

As Tabelas 6 a 8 apresentam os 226 documentos do tema principal conforme foram agrupados em tópicos e subtópicos em que serão apresentados ao longo do presente capítulo.

Refere-se que os artigos integrados em cada subtópico não aludem exclusivamente ao mesmo, abrangendo usualmente várias temáticas. Apenas se tentou melhor enquadrar cada artigo no subtópico que melhor o caracterizava.

Optou-se por apresentar o resumo individual de cada artigo, separadamente, de forma a melhor possibilitar a identificação e consulta do documento original, caso a leitura deste trabalho estimule o interesse ou a curiosidade dos leitores, em aprofundar os temas em análise.

Tabela 6 - Documentos por tópico (Parte 1)

| <b>Tópico</b> | <b>Subtópico</b>              | <b>Autores</b>   |
|---------------|-------------------------------|--|
| Absorção      | Tratamento de águas residuais | Chen <i>et al.</i> (2020); Crini & Lichtfouse (2019); Crini <i>et al.</i> (2019); Guévar <i>et al.</i> (2017); Hira <i>et al.</i> (2023); Meng <i>et al.</i> (2022); Rodríguez-Iglesias <i>et al.</i> (2022); Russo <i>et al.</i> (2021); Tang <i>et al.</i> (2014); Thomas <i>et al.</i> (2018); Tran <i>et al.</i> (2023); Zueva <i>et al.</i> (2020)  |
|               | Nanomateriais                 | Ali <i>et al.</i> (2020); Aslam <i>et al.</i> (2021); Ayalew (2022); Bhat <i>et al.</i> (2022); Ghosh <i>et al.</i> (2022); Gutierrez <i>et al.</i> (2017); Ibrahim <i>et al.</i> (2022); Irshad <i>et al.</i> (2023); Mateus <i>et al.</i> (2021); Mpongwana & Rathilal (2022); Mudhoo & Sillanpää (2021); Nasrollahzadeh <i>et al.</i> (2021); Piaskowski & Zarzycki (2020); Sheoran <i>et al.</i> (2022); Yaqoob <i>et al.</i> (2020)   |
|               | Bioabsorventes naturais       | Alves <i>et al.</i> (2020); Alsawy <i>et al.</i> (2022); Ben-Ali (2021); Carvalho <i>et al.</i> (2011); Dang <i>et al.</i> (2021); De Tuesta <i>et al.</i> (2022); Dong, Shan, <i>et al.</i> (2022); El Messaoudi, <i>et al.</i> (2022); Elshabrawy <i>et al.</i> (2023); Farias <i>et al.</i> (2023); Fritzen & Benetti, (2021); Gul <i>et al.</i> (2021); Hagemann <i>et al.</i> (2020); Halysh <i>et al.</i> (2020); Hu <i>et al.</i> (2019); Ibrahim <i>et al.</i> (2021); Joseph <i>et al.</i> (2020); Karic <i>et al.</i> (2022); Kasera <i>et al.</i> (2022); Lamaming <i>et al.</i> (2022); Li <i>et al.</i> (2019); Ma <i>et al.</i> (2018); Mestre <i>et al.</i> (2022); Saka <i>et al.</i> (2012); Saleem <i>et al.</i> (2019); Shukla <i>et al.</i> (2020); Turcanu <i>et al.</i> (2022); Wang <i>et al.</i> (2020); Younas <i>et al.</i> (2021); Zheng <i>et al.</i> (2019); Zungu <i>et al.</i> (2022) |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 - Documentos por tópico (Parte 2)

| <b>Tópico</b>    | <b>Subtópico</b>                 | <b>Autores</b>   |
|------------------|----------------------------------|--|
| Absorção         | Bioabsorventes minerais          | De-La-Vega <i>et al.</i> (2018); Doekhi-Bennani <i>et al.</i> (2021); ElBastamy <i>et al.</i> (2021); Fetene & Addis (2020); Gamba <i>et al.</i> (2015); Jamil <i>et al.</i> (2023); Khan <i>et al.</i> (2022); Kolakovic <i>et al.</i> (2013); Kolakovic <i>et al.</i> (2014); Liu <i>et al.</i> (2018); Maged <i>et al.</i> (2023); Mazeikiene & Valentukeviciene (2016); Rahman <i>et al.</i> (2022); Tony (2020)   |
|                  | Absorventes de grafeno e carbono | Ali <i>et al.</i> (2019); Ben Mosbah <i>et al.</i> (2020); Kogut <i>et al.</i> (2022); Liu <i>et al.</i> (2020)  |
|                  | Reutilização de resíduos         | Chiang <i>et al.</i> (2003); Cho & Suzuki (1980); Edet & Ifelebuegu (2020); Maslon & Czarnota (2020); Rio <i>et al.</i> (2004); Saner <i>et al.</i> (2022); Yasipourtehrani <i>et al.</i> (2021)   |
| Eletrocoagulação | Tratamento de águas residuais    | Butler <i>et al.</i> (2011); Cid <i>et al.</i> (2018); Ebba <i>et al.</i> (2021); Elkhatib <i>et al.</i> (2021); Hand & Cusick (2021); Jing <i>et al.</i> (2020); Kamyab <i>et al.</i> (2022); Lajayer <i>et al.</i> (2020); Llanos <i>et al.</i> (2017); Marmanis <i>et al.</i> (2022); Muddemann <i>et al.</i> (2019); Omran <i>et al.</i> (2021); Sher <i>et al.</i> (2020); Shirkoohi <i>et al.</i> (2022); Tahreen <i>et al.</i> (2020); Uludag-Demirer <i>et al.</i> (2020); Yao <i>et al.</i> (2022); Zhai <i>et al.</i> (2013); Zheng <i>et al.</i> (2017)   |
|                  | Processos combinados             | Ajmi <i>et al.</i> (2018); Asfaha <i>et al.</i> (2021); Bazrafshan <i>et al.</i> (2022); Bhagawan <i>et al.</i> (2018); Chakinala <i>et al.</i> (2009); Hallmann <i>et al.</i> (2012); Ribeiro <i>et al.</i> (2023); Yu <i>et al.</i> (2020)   |
|                  | Processos de oxidação avançada   | Bermúdez <i>et al.</i> (2021); Brosler <i>et al.</i> (2023); Chen <i>et al.</i> (2022); Crousier <i>et al.</i> (2016); Deng & Zhao (2015); Ding <i>et al.</i> (2014); Dong, Chen, <i>et al.</i> (2022); Dong <i>et al.</i> (2019); Feijoo <i>et al.</i> (2023); Fernández-Marchante <i>et al.</i> (2021); Gomis <i>et al.</i> (2015); González <i>et al.</i> (2023); Gopalakrishnan <i>et al.</i> (2023); Guerra-Rodríguez <i>et al.</i> (2018); Heidari <i>et al.</i> (2021); Heim <i>et al.</i> (2015); Hussain <i>et al.</i> (2021); Jawad <i>et al.</i> (2016); Jiang <i>et al.</i> (2023); Johnson & Mehrvar (2022); Krishnan <i>et al.</i> (2017); Kumar <i>et al.</i> (2020); Kurian, (2021); Lacson <i>et al.</i> (2018); Li <i>et al.</i> (2016); Lin <i>et al.</i> (2021); Liu <i>et al.</i> (2022); Mancuso <i>et al.</i> (2020); Metin & Çifçi (2023); Orlandi <i>et al.</i> (2019); Papoutsakis <i>et al.</i> (2015); Pérez <i>et al.</i> (2018); Pérez <i>et al.</i> (2019); Pervez <i>et al.</i> (2020); Qu <i>et al.</i> (2024); Raji & Mirbagheri (2021); Ribeiro & Nunes (2021); Shangguan <i>et al.</i> (2018); Sonawane <i>et al.</i> (2022); Starling <i>et al.</i> (2021); Tsydenova <i>et al.</i> (2015); Villegas-Guzman <i>et al.</i> (2017); Wang <i>et al.</i> (2022); Wei <i>et al.</i> (2020); Yang & Hoffmann (2016); Yang <i>et al.</i> (2019); Zhang <i>et al.</i> (2021); Ziembowicz <i>et al.</i> (2022) |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 - Documentos por tópico (Parte 3)

| <b>Tópico</b>    | <b>Subtópico</b>                      | <b>Autores</b>   |
|------------------|---------------------------------------|--|
| Eletrocoagulação | Tratamento de efluentes de indústrias | Ahmed <i>et al.</i> (2018); Bidu <i>et al.</i> (2021); Bilinska & Gmurek (2021); Bogacki & Al-Hazmi (2017); Cano <i>et al.</i> (2020); Castillo-Suárez <i>et al.</i> (2023); Cristóvão <i>et al.</i> (2015); Deng <i>et al.</i> (2022); De Witte <i>et al.</i> (2010); Labrada <i>et al.</i> (2018); Lobo <i>et al.</i> (2016); Meiramkulova <i>et al.</i> (2020); Radelyuk <i>et al.</i> (2019); Sandi <i>et al.</i> (2020); Tien & Luu (2020); Torres-Pinto <i>et al.</i> (2023); Yao <i>et al.</i> (2019); Zou <i>et al.</i> (2020) |
|                  | Reutilização de resíduos              | Bashir <i>et al.</i> (2020); Sari-Erkan (2019)   |
| Floculação       | Tratamento de águas residuais         | Cai <i>et al.</i> (2019); Chhetri <i>et al.</i> (2022); Dawood & Li (2013); He <i>et al.</i> (2016); Mian <i>et al.</i> (2018)   |
|                  | Coagulantes naturais                  | Abiyu <i>et al.</i> (2018); Chua <i>et al.</i> (2019); Chua <i>et al.</i> (2020); Kristianto <i>et al.</i> (2019); Lugo <i>et al.</i> (2020); Shan <i>et al.</i> (2017); Sultana <i>et al.</i> (2022); Vigneshwaran <i>et al.</i> (2020); Villaseñor-Basulto <i>et al.</i> (2018)  |
|                  | Coagulantes orgânicos                 | Cainglet <i>et al.</i> (2020); Smoczynski <i>et al.</i> (2016)   |
|                  | Coagulantes inorgânicos               | Ferreira & Waelkens (2009); Pradhan <i>et al.</i> (2013); Uysal & Boyacioglu (2021)  |
|                  | Biofloculantes                        | Agunbiade <i>et al.</i> (2016); Ajao <i>et al.</i> (2018); Alias <i>et al.</i> (2022); Das <i>et al.</i> (2021); Gupta <i>et al.</i> (2023); Hung <i>et al.</i> (2020); Kolya & Kang (2023); Kurniawan <i>et al.</i> (2020); Lee <i>et al.</i> (2014); Li <i>et al.</i> (2020); Lichtfouse <i>et al.</i> (2019); Makhtar <i>et al.</i> (2020); Mukherjee <i>et al.</i> (2013); Tsilo <i>et al.</i> (2022); Zaman (2018)  |
|                  | Tratamento de efluentes de indústrias | Aragaw & Bogale (2023); Artifon <i>et al.</i> (2021); Boguniewicz-Zablocka <i>et al.</i> (2020); Ishak <i>et al.</i> (2020); Mortadi <i>et al.</i> (2020); Park <i>et al.</i> (2018)   |
|                  | Reutilização de resíduos              | Kyrii <i>et al.</i> (2020); Li <i>et al.</i> (2009); Xu <i>et al.</i> (2019)   |
| Hidrodecloração  |                                       | Antia (2022); Hamdan <i>et al.</i> (2023); Oprckal <i>et al.</i> (2017); Raman <i>et al.</i> (2021); Yun <i>et al.</i> (2018)  |

Fonte: Elaboração própria

## 4.2 ABSORÇÃO

### 4.2.1 Tratamento de águas residuais

Neste ponto apresentam-se algumas linhas gerais sobre o tratamento de águas residuais com recurso à absorção.

Assim, constatou-se em Tran *et al.* (2023) uma variedade de técnicas utilizadas para eliminar não apenas metais pesados, como também outros contaminantes, como fármacos, das águas residuais. Estes autores analisam vários fatores, comparando as tecnologias de forma clara e concisa, utilizando ferramentas como tabelas e gráficos, com o objetivo de avaliar a sustentabilidade das mesmas. Crini & Lichtfouse (2019) destacam a contaminação da água por substâncias químicas e biológicas, resultado de atividades domésticas e industriais. Para sanar esse problema, foram desenvolvidos diversos métodos de tratamento de efluentes, combinando processos físicos, químicos e biológicos, com o objetivo de remover tanto partículas sólidas quanto substâncias dissolvidas na água. O seu artigo oferece uma visão geral dessas tecnologias de tratamento, comparando as suas vantagens e desvantagens. A figura seguinte foi extraída do seu artigo.

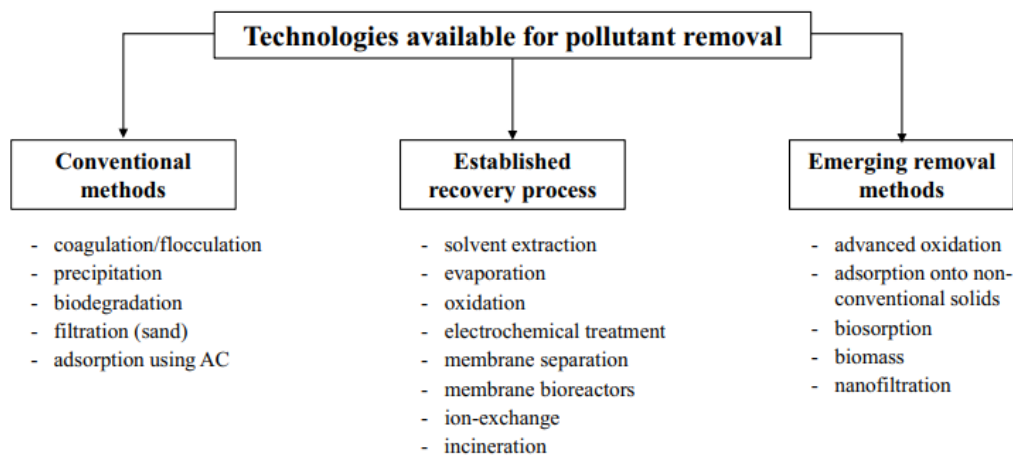


Figura 49 - Classificação das tecnologias disponíveis para a remoção de poluentes e exemplo de técnicas  
 Fonte: Crini & Lichtfouse (2019)

Crini *et al.* (2019) analisam a adsorção, processo de captura de contaminantes por materiais sólidos, usualmente com recurso a carbono ativado, um adsorvente eficaz, mas caro, tornando necessário a exploração de adsorventes não convencionais, com alternativas mais baratas e eficientes. A adsorção é uma técnica promissora para a limpeza da água, e os autores exploram as vantagens e desvantagens de diferentes materiais adsorventes e os mecanismos que regem esse processo. Os autores Hira *et al.* (2023) classificam os adsorventes em cinco categorias principais e oferecem uma visão detalhada dos mecanismos de adsorção, auxiliando na seleção de materiais mais eficientes para cada tipo de contaminante. Chen *et al.* (2020) realizaram uma revisão abrangente das tecnologias empregues no tratamento de águas residuais. Os autores destacam a complexidade da composição das águas residuais, com múltiplos tipos de metais pesados, em diferentes concentrações e a necessidade de combinar

diferentes métodos (químicos, físico-químicos e biológicos) para alcançar a máxima eficiência de remoção.

A otimização do tratamento de efluentes numa fábrica de fertilizantes italiana, com o objetivo de alcançar a descarga líquida zero foi descrita por Zueva *et al.* (2020). A sua pesquisa focou-se na remoção de fluoretos e fosfatos, permitindo a reutilização da água no processo produtivo e a recuperação de nutrientes. O potencial dos biopolímeros e dos seus compósitos na remoção de contaminantes de águas residuais foi destacada por Russo *et al.* (2021). A sua revisão aborda os mecanismos de adsorção, os tipos de poluentes removidos e as perspetivas futuras para o desenvolvimento de novos materiais adsorventes. Tang *et al.* (2014) desenvolveram um novo hidrogel magnético com alta capacidade de adsorção e recuperação de crómio em águas residuais. Através de experiências de regeneração, os autores demonstraram a eficácia do material em múltiplos ciclos de tratamento, com taxas de remoção superiores a 97%.

A complexidade dos efluentes gerados no processamento de minérios metálicos não ferrosos, ricos em metais pesados e compostos orgânicos é destacada por Meng *et al.* (2022). A sua revisão aborda as fontes desses contaminantes, os riscos associados, as tecnologias de tratamento disponíveis e a importância da reutilização da água tratada. Thomas *et al.* (2018) demonstraram a eficácia do tritocarbonato de sódio como precipitante para a remoção de metais pesados em efluentes da indústria de impressão de placas de circuito. Através de um estudo otimizado, os autores obtiveram uma redução significativa nas concentrações de cobre, níquel e estanho. A eficácia da troca iónica na remoção de fluoretos de efluentes da indústria de coque foi avaliada por Rodríguez-Iglesias *et al.* (2022). Duas resinas impregnadas com alumínio foram comparadas, sendo uma delas mais eficiente na remoção. Os resultados indicam o potencial da troca iónica para tratar esse tipo de efluente. Guévar *et al.* (2017) demonstraram que o titanato de bário, em diferentes formas nanométricas (fibras, tubos e folhas), apresenta alta capacidade e seletividade para a remoção de estrôncio, inclusive em ambientes de alta salinidade como a água do mar.

#### 4.2.2 Nanomateriais

No âmbito da nanotecnologia, Aslam *et al.* (2021) fazem uma revisão sobre o uso de nanotubos de carbono para a remoção de contaminantes em água. Os autores enfatizam a necessidade de mais pesquisas, em condições reais de água, para avaliar o potencial prático dessa tecnologia. O potencial da nanotecnologia para revolucionar o tratamento de águas residuais é destacado por Bhat *et al.* (2022). Os nanomateriais, como nanopartículas e nanotubos de carbono, demonstram alta eficiência na remoção de diversos contaminantes. No entanto, o alto custo, desafios de escala e preocupações ambientais e de saúde limitam a sua aplicação em larga escala. A colaboração entre diferentes áreas é fundamental para

superar esses obstáculos e tornar essa tecnologia mais acessível e sustentável. Nasrollahzadeh *et al.* (2021) comprovam que a nanotecnologia de carbono tem revolucionado o tratamento de águas e efluentes. A sua revisão aborda a aplicação de nanomateriais carbonáceos, como nanotubos carbono, grafeno, e seus derivados, na adsorção de diversos poluentes. Os autores discutem os mecanismos de adsorção e as perspectivas para o desenvolvimento de novos nanoadsorventes.

O potencial do óxido de grafeno no tratamento de águas residuais é destacado por Piaskowski & Zarzycki (2020). A sua revisão compara diferentes materiais carbonáceos, como carvão ativado e grafite, e avalia os efeitos de nanopartículas de carbono em águas residuais e lamas ativadas. Os resultados preliminares indicam a necessidade de mais pesquisas para otimizar o uso dessas nanopartículas na purificação da água. Sheoran *et al.* (2022) destacam o potencial dos nanomateriais de carbono para remover metais pesados de águas residuais. O seu artigo discute as vantagens e desafios dessa abordagem, enfatizando a necessidade de mais estudos sobre a toxicidade desses materiais. Esta revisão aborda os impactos dos metais pesados e as perspectivas futuras para o uso de nanomateriais no tratamento de água.

O potencial dos nanocompósitos de argila para o tratamento de água e efluentes é destacado por Ayalew (2022). O seu artigo aborda a preparação, propriedades e eficácia desses materiais na remoção de diversos poluentes. Embora os resultados sejam promissores, são necessárias mais pesquisas para viabilizar a produção em larga escala e a aplicação em ambientes industriais. Mateus *et al.* (2021) propõem uma nova abordagem para o tratamento de efluentes da indústria alimentar, combinando técnicas tradicionais com nanopartículas magnéticas incorporadas em betonite. Essa combinação mostrou-se eficaz na remoção de poluentes em efluentes da produção de barras de goiaba, permitindo a reutilização da água para fins agrícolas.

Ghosh *et al.* (2022) analisam 5 nanopartículas de óxidos metálicos (óxido de titânio, óxido de ferro, óxido de cobre, óxido de zinco e dióxido de magnésio), sendo que as nanopartículas de dióxido de magnésio são as que têm a maior capacidade de absorção. Esse artigo aborda as aplicações das 5 nanopartículas na remoção da poluição da água, comparando as circunstâncias, os limites e a eficiência. O potencial das nanopartículas magnéticas de óxido de ferro como nanoabsorventes para o tratamento de água é demonstrado por Gutierrez *et al.* (2017). A sua revisão destaca a viabilidade de tecnologias de separação magnética, reutilizáveis e economicamente atrativas, baseadas nesses materiais. As nanopartículas de óxido de ferro mostram-se eficazes na remoção de diversos poluentes em diferentes meios, abrindo novas perspectivas para o tratamento de água, de forma mais eficiente e sustentável.

Ibrahim *et al.* (2022) realizam uma revisão abrangente sobre o uso de nanomateriais no tratamento de águas residuais, com foco em métodos experimentais e de simulação. O estudo aborda o uso de membranas e nanopartículas, destacando a eficiência na remoção de poluentes devido às propriedades únicas dos nanomateriais. Os resultados sugerem que essa abordagem pode revolucionar o tratamento

de água. Mpongwana & Rathilal (2022) destacam o potencial da nanotecnologia para tratar águas residuais, mas apontam os desafios do alto custo e do consumo energético. A sua revisão explora o uso de fontes renováveis e métodos biológicos para produzir nanopartículas de forma mais sustentável e económica. Os autores discutem as perspetivas de mercado e a viabilidade económica dessa abordagem, considerando os seus desafios e oportunidades.

Mudhoo & Sillanpää (2021) destacam os desafios de aplicar nanoadsorventes em sistemas de tratamento de água em larga escala. A sua revisão foca-se nos nanoadsorventes magnéticos para a remoção de micropoluentes, analisando as vantagens e os obstáculos da integração da separação magnética nas ETAR existentes. Diferentes métodos para remover o crómio de águas residuais, com destaque para o uso de nanomateriais são revistos por Irshad *et al.* (2023). Apesar das vantagens, como a alta eficiência na remoção de metais pesados, o seu artigo aponta também desafios a superar. A sua pesquisa sugere que o desenvolvimento de nanopartículas ecológicas pode superar essas limitações, oferecendo uma solução mais sustentável e económica para o tratamento de água, especialmente nos países em desenvolvimento. Diversas aplicações de nanomateriais no tratamento de águas contaminadas por metais pesados, compostos orgânicos e inorgânicos são abordados por Yaqoob *et al.* (2020). Ali *et al.* (2020) destacam a adsorção como uma técnica eficiente e sustentável para tratar águas residuais. A sua revisão abrange uma variedade de adsorventes, como sílica gel, carvão ativado e zeólita, e analisa as suas capacidades na remoção de diferentes poluentes. Os autores enfatizam o potencial dos nanoadsorventes magnéticos, que facilitam a separação e regeneração, mas apontam a necessidade de mais estudos em escala industrial para avaliar a sua viabilidade.

#### 4.2.3 Bioadsorventes naturais

Alsawy *et al.* (2022) analisam a regeneração química do biocarvão contaminado por diversos poluentes. O estudo explora os fatores que influenciam a eficiência desse processo e destacam a importância de minimizar a contaminação secundária e sugerem direções para pesquisas futuras, com vista a um uso mais sustentável do biocarvão no tratamento de águas residuais. O potencial do biocarvão nitrogenado, produzido a partir de resíduos de biomassa, para remover contaminantes de águas é explorado por Kaseera *et al.* (2022). O seu artigo detalha os métodos de produção e as vantagens da incorporação de nitrogénio, além de discutir as perspetivas futuras para o desenvolvimento desse material, com vista a um tratamento de águas residuais mais eficiente e sustentável. Li *et al.* (2019) produziram nove tipos de biocarvão a partir de diferentes resíduos de biomassa, variando as condições de carbonização. O estudo avaliou o desempenho desses biocarvões na remoção de metais pesados, sendo que os resultados demonstram o potencial do biocarvão como adsorvente de baixo custo e alta eficiência, contribuindo para a gestão de resíduos e o tratamento de águas contaminadas.

De Tuesta *et al.* (2022) demonstram a viabilidade de produzir hidrocarbonetos e microsferas de carvão ativado a partir de cascas de tangerina, utilizando cloreto de ferro como ativador. Essa pesquisa evidencia o potencial de transformar resíduos de biomassa em materiais de alto valor agregado, promovendo a economia circular e oferecendo uma solução sustentável para o tratamento de resíduos. Um nanocompósito inovador foi desenvolvido por El Messaoudi, *et al.* (2022), combinando biocarvão de folhas *Eriobotrya japónica* (nespereira) com nanopartículas de óxido de magnésio, para remover corantes de águas residuais. O estudo demonstrou que o material pode ser regenerado, tornando-o uma opção promissora para o tratamento de efluentes. Hagemann *et al.* (2020) produziram biocarvão ativado a partir de madeira e dos seus resíduos. O estudo demonstrou que a eficácia na remoção de micropoluentes orgânicos é mais influenciada pela dosagem do agente de ativação do que pela qualidade da madeira. Os autores destacam o potencial do biocarvão produzido localmente para melhorar o tratamento de águas residuais, ressaltando a importância de considerar os custos associados ao pré-tratamento da matéria-prima.

Zheng *et al.* (2019) avaliam o potencial de biocarvão modificado como adsorvente para a remoção de fósforo em efluentes de tratamento secundário de ETAR. Os resultados indicaram que o biocarvão modificado apresenta alta capacidade de adsorção de fósforo. Além disso, o biocarvão carregado com fósforo demonstrou promover o crescimento de plantas, evidenciando o seu potencial como fertilizante. Zungu *et al.* (2022) visaram produzir biocarvão a partir de borra de café e avaliar o seu potencial na remoção de produtos farmacêuticos em efluentes. Os resultados demonstram que o biocarvão produzido a partir deste resíduo apresenta alta capacidade de adsorção destes contaminantes, tornando-se uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuais e a mitigação da poluição ambiental.

Alves *et al.* (2020) demonstraram que a casca de *Pinus elliottii* é um bioadsorvente mais eficaz do que o carvão ativado comercial para a remoção de hormonas sintéticas e naturais da água. O seu estudo destaca o potencial da casca de *Pinus elliottii* como uma alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de águas contaminadas, sugerindo a necessidade de pesquisas adicionais para otimizar o seu uso em escala real. Foi demonstrado por Mestre *et al.* (2022) que o carvão ativado produzido a partir de cascas de pinhão apresenta desempenho superior aos adsorventes comerciais convencionais na remoção de fármacos em efluentes de ETAR. Essa pesquisa destaca o potencial da biomassa de pinhas e cascas de pinhão como fonte de adsorventes eficientes e sustentáveis para o tratamento de águas residuais. O potencial do bambu como matéria-prima para a produção de diversos adsorventes, como carvão ativado, biocarvão e aerogel, para o tratamento de águas residuais foi demonstrado por Lamaming *et al.* (2022). A sua pesquisa destaca a eficiência desses materiais na remoção de contaminantes e a possibilidade de reciclagem, tornando o bambu uma alternativa sustentável e versátil para a descontaminação de águas residuais.

Ben-Ali (2021) avaliou o potencial da casca de romã natural e modificada para a remoção de metais, corantes e outros poluentes de águas residuais. Os resultados indicam que a casca de romã natural, mesmo sem tratamento, apresenta alta capacidade de adsorção, rivalizando com o carvão ativado. Além disso, a água utilizada para lavar a casca pode ser aproveitada para extrair taninos, que possuem aplicações como corantes naturais. Farias *et al.* (2023) estudaram a capacidade do pó da casca de banana para sorção de poluentes como o azul de metileno, a atrazina e o glifosato, tendo os resultados sugerido que este é um biomaterial económico, sem químicos e amigo do ambiente para o tratamento de águas residuais na remoção de pesticidas recalcitrantes e outros poluentes orgânicos. Ma *et al.* (2018) demonstraram que a casca de uva, submetida a tratamentos, torna-se um biossorvente eficiente e de baixo custo para a remoção de corantes, como o azul de metileno, de águas residuais. Os resultados indicam que esses processos aumentam significativamente a capacidade de adsorção da casca de uva, tornando-a uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes.

Saleem *et al.* (2019) destacam o potencial dos caroços de azeitona como matéria-prima para a produção de carvão ativado, um adsorvente eficiente para o tratamento de águas contaminadas por compostos orgânicos. A revisão realizada pelos autores evidencia a relevância deste material na remoção de diversos poluentes, consolidando os caroços de azeitona como uma alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de efluentes. A capacidade de adsorção de carvões ativados produzidos a partir de casca de coco, laranja e banana, variando o tamanho de partícula e a concentração do adsorvente é avaliada por Shukla *et al.* (2020). Os resultados indicam que o carvão ativado de casca de laranja apresentou a maior capacidade de remoção de poluentes. Essa pesquisa contribui para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis e económicas para o tratamento de águas contaminadas.

Elshabrawy *et al.* (2023) demonstraram que a polpa do bagaço da cana-de-açúcar é um adsorvente eficaz para a remoção de azul de metileno de efluentes têxteis. Os resultados indicam que este material natural apresenta alta capacidade de adsorção, atingindo até 95% de remoção do corante. Além disso, o estudo sugere que a polpa do bagaço pode ser transformada em carvão ativado para otimizar ainda mais o processo de tratamento. Ibrahim *et al.* (2021) demonstraram que o biocarvão dos resíduos dos cachos de palma, após tratamento com ácido nítrico, apresenta um aumento significativo na capacidade de adsorver corantes, como o azul de metileno. Esses resultados indicam que a funcionalização hidrotérmica é uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho do biocarvão, tornando-o um adsorvente promissor para o tratamento de efluentes industriais.

Carvalho *et al.* (2011) propõem a utilização de cascas de ovo como uma alternativa económica e sustentável para a produção de adsorventes. A revisão realizada pelos autores evidencia o potencial das cascas de ovo e das suas membranas na remoção de poluentes, destacando a viabilidade de sua aplicação em larga escala, com baixo custo e mínimo processamento. A eficiência de cascas de ovo calcinadas a

diferentes temperaturas, para a remoção de fósforo em ETAR foi avaliada por Fritzen & Benetti, (2021). Os resultados indicaram que a calcinação a temperaturas mais elevadas promove uma maior capacidade de adsorção de fósforo pelas cascas de ovo. Os autores destacam a necessidade de estudos adicionais para avaliar o potencial do material resultante como fertilizante e a viabilidade econômica desse processo.

Halysh *et al.* (2020) exploraram o reaproveitamento de resíduos de biossorbentes, à base de casca de noz, para materiais de construção. Ao adicionar esses resíduos ao cimento, os autores observaram que a lignocelulose pode ser utilizada em pequenas quantidades sem comprometer significativamente as propriedades do material. No entanto, a celulose mostrou-se menos adequada, afetando negativamente a resistência do cimento. O potencial da carbonização hidrotérmica de biorresíduos para produzir adsorbentes eficientes na remoção de poluentes de águas residuais é destacado por Turcanu *et al.* (2022). O seu estudo ressalta as vantagens desse processo para a produção de materiais sustentáveis.

Dong, Shan, *et al.* (2022) desenvolveram hidrogéis magnéticos à base de quitosano com alta capacidade de remoção seletiva de metais pesados em soluções aquosas. Esses materiais apresentam excelente desempenho e podem ser reciclados diversas vezes, tornando-se uma opção sustentável para o tratamento de águas residuais. Wang *et al.* (2020) desenvolveram microesferas anfotéricas de quitosano/gelatina com alta capacidade de remover corantes azo. As microesferas mostraram-se eficientes e podem ser regeneradas, tornando-as uma opção promissora para o tratamento de efluentes.

Gul *et al.* (2021) referem que o biocarvão pode ser produzido a partir de lignina e resíduos ricos em lignina, como digestato e caroços de azeitona. Nesse artigo, pretendem investigar a preparação e produção de biocarvão de lignina, um recurso disponível em grande quantidade, para aplicação no tratamento de águas residuais, revelando-se um material eficiente em pequena e grande escala. Hu *et al.* (2019) utilizaram resíduos de resina fenólica para produzir carvão ativado, que se mostrou eficaz na remoção do corante azul de metileno. Os resultados indicam que o processo de adsorção é espontâneo e favorecido por temperaturas mais elevadas, demonstrando o potencial do material para o tratamento de efluentes.

Joseph *et al.* (2020) demonstraram que a utilização de biorresíduos e biomassa de intervenções paisagísticas na remoção de micropoluentes em ETAR é mais sustentável do que o uso de carvão ativado convencional. Essa abordagem reduz o impacto ambiental e energético, além de promover a autossuficiência das ETAR. A lignocelulose de folhas caídas é um adsorbente eficaz para a remoção de zinco de soluções aquosas, conforme demonstrado por Dang *et al.* (2021). Os resultados do seu trabalho indicam que essa biomassa abundante pode ser uma alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de águas contaminadas por metais pesados. O potencial dos resíduos agrícolas, como pedras e ervas, para o tratamento de águas residuais é destacado por Karic *et al.* (2022). Esses resíduos podem ser utilizados de diversas formas, desde a aplicação direta como adsorbentes até a produção de materiais

mais sofisticados, como o carvão ativado. Essa abordagem transforma um problema em uma oportunidade, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular.

Saka *et al.* (2012) demonstraram que diversos resíduos agrícolas e florestais, como cascas de frutas, folhas e bagaço, podem ser utilizados como adsorventes eficientes para a remoção de chumbo em águas residuais. Essa abordagem oferece uma alternativa mais sustentável e econômica ao carvão ativado convencional. Alguns desses materiais são: cascas de citrinos, cascas de cacau, resíduos de casca de manga, cascas de cebola, farelo de milho, farelo de trigo, cinzas de casca de arroz, pétalas de rosa, alga *Ascophyllum nodosum* e bagaço de cana-de-açúcar. Younas *et al.* (2021) abordam os principais adsorventes derivados de materiais agrícolas e não agrícolas utilizados no tratamento de águas contaminadas. São discutidos os mecanismos de remoção de poluentes, as possibilidades de modificação dos adsorventes para melhorar a sua eficiência, além de aspectos como a reutilização, rejeição e viabilidade econômica.

#### 4.2.4 Bioadsorventes minerais

De-La-Vega *et al.* (2018) desenvolveram uma zeólita faujasita com excelente capacidade de remover diversos poluentes, como matéria orgânica, nitrogênio amoniacal, dureza e metais pesados, de águas residuais. A zeólita sintetizada mostrou-se estável e reutilizável, tornando-a uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes municipais. Um novo método para tratar águas residuais, utilizando granulado de sílica zeólita mordenita para remover simultaneamente amônia e o antibiótico sulfametoxazol é proposto por Doekhi-Bennani *et al.* (2021). O material adsorvente pode ser regenerado com ozono e reutilizado em diversos ciclos, tornando o processo eficiente e sustentável. ElBastamy *et al.* (2021) compararam a eficiência de três materiais (zeólita, diatomita e bentonita) na remoção de poluentes de águas residuais para posterior reutilização na irrigação. Os resultados indicaram que a bentonita foi o material mais eficaz, seguida da diatomita e da zeólita. Tanto a bentonita quanto a diatomita proporcionaram uma qualidade de água adequada para a irrigação, com destaque para a bentonita.

Rahman *et al.* (2022) realizaram uma revisão completa sobre o uso de nanozeólitas no tratamento de água e efluentes. Os autores destacam o potencial dessas nanoestruturas para a remoção de contaminantes através de diversos mecanismos, como troca iônica e adsorção. A sua revisão identifica as principais lacunas de conhecimento e direciona futuras pesquisas nesta área promissora.

Mazeikiene & Valentukeviciene (2016) investigaram a utilização de zeólita natural para remover amônia de filtrados provenientes da desidratação de lamas de tratamento de águas residuais. A zeólita saturada com amônia pode ser posteriormente utilizada como fertilizante, transformando um resíduo num recurso valioso. Resíduos de lamas de alumínio podem ser transformados em adsorventes eficientes

para a remoção de corantes têxteis, conforme demonstra Tony (2020). A presença de zeólita nos materiais, combinada com grafite em alguns casos, resultou numa capacidade de adsorção superior à de materiais comerciais, como sílica gel e carvão ativado.

Kolakovic *et al.* (2014) investigaram a influência de diversos fatores na capacidade de adsorção de um surfactante, o SDBAC (cloreto de benzalcônio) em tufos de zeólita natural, com o objetivo de desenvolver novos materiais adsorventes, organo-zeólitas, para o tratamento de águas residuais. Os resultados deste estudo são cruciais para otimizar a produção de organo-zeólitas e a sua aplicação em sistemas de filtração. Foi demonstrado por Kolakovic *et al.* (2013) que organo-zeólitas são eficazes na remoção de matéria orgânica e nitrato de águas residuais da indústria de laticínios. Os resultados do seu estudo indicam que esses materiais têm grande potencial para serem utilizados como filtros em sistemas de tratamento de efluentes lácteos. O estudo também fornece diretrizes para a otimização e implementação dessa tecnologia em escala industrial. Gamba *et al.* (2015) demonstraram que a montmorilonita organofílica (OMt) é mais eficiente que a montmorilonita natural (Mt) na remoção do fungicida imazalil (IMZ) de efluentes agrícolas. A modificação da argila com octadeciltrimetilamônio otimizou a adsorção do IMZ, tornando a OMt uma alternativa promissora para o tratamento de águas contaminadas.

Fetene & Addis (2020) demonstraram que a pedra-pomes é um adsorvente eficaz e de baixo custo para a remoção de fosfato em tratamentos terciários de efluentes municipais. A pesquisa mostrou que a pedra-pomes pode ser regenerada e reutilizada, tornando-a uma opção viável para a remoção de fosfato. No entanto, são necessários estudos adicionais para otimizar o processo. Um adsorvente inovador, combinando argila betonítica e nanotubos de carbono, para tratar águas residuais da indústria têxtil foi desenvolvido por Jamil *et al.* (2023). Esse material mostrou-se altamente eficaz na remoção de corantes orgânicos, contribuindo para a sustentabilidade hídrica. Maged *et al.* (2023) apresentam uma revisão abrangente sobre o uso de argilas e geopolímeros à base de argilas no tratamento de água contaminada. O estudo explora as técnicas de produção e as propriedades desses materiais, destacando a sua eficácia na remoção de diversos poluentes. Os autores enfatizam o potencial desses materiais para uma economia circular e a importância de pesquisas futuras para otimizar a sua utilização. Um novo adsorvente, combinando gel de sílica com nanocompósitos de polianilina, para tratar águas residuais contaminadas por corantes orgânicos foi desenvolvido por Khan *et al.* (2022). Os resultados demonstram que esse material é altamente eficiente na remoção desses poluentes, apresentando vantagens em relação a adsorventes comerciais. Liu *et al.* (2018) desenvolveram ferritas magnéticas como uma nova ferramenta para remover cádmio de águas residuais. Graças às suas propriedades magnéticas, as ferritas podem ser facilmente separadas da água após a adsorção, tornando o processo mais eficiente e económico.

#### 4.2.5 Absorventes de grafeno e carbono

Ali *et al.* (2019) destacam a eficácia da absorção utilizando materiais à base de grafeno para remover poluentes de águas residuais. O grafeno e seus compostos demonstram excelente capacidade de adsorver metais pesados e compostos orgânicos, superando os tradicionais filtros de carbono ativado. Materiais não-tecidos modificados com grafeno para remover a tetraciclina, um antibiótico presente em ambientes aquáticos foram desenvolvidos por Kogut *et al.* (2022). Além disso, o estudo demonstra que a adição de grafeno melhora as propriedades antibacterianas e antifúngicas desses materiais, tornando-os promissores para aplicações ambientais. Liu *et al.* (2020) apresentam uma revisão completa sobre o uso de grafeno e dos seus compostos no tratamento de diferentes tipos de águas residuais. O estudo destaca as propriedades únicas do grafeno como adsorvente e catalisador, analisando a sua eficiência e os mecanismos envolvidos. Além disso, o artigo discute os desafios e as perspectivas futuras para o uso do grafeno nesse contexto. A capacidade de materiais de carbono poroso na remoção de diversos poluentes de águas residuais, como metais pesados e compostos orgânicos foi investigada por Ben Mosbah *et al.* (2020). O estudo apresenta exemplos de aplicações e discute a necessidade de otimizar os métodos de produção e caracterização desses materiais para uma aplicação mais ampla.

#### 4.2.6 Reutilização de resíduos

Chiang *et al.* (2003) exploraram a possibilidade de transformar biossólidos duma ETAR de uma indústria petroquímica, em adsorventes. Através da ativação com cloreto de zinco, os autores produziram materiais eficientes para a remoção de poluentes, demonstrando que as condições de pirólise, como temperatura e tempo, são cruciais para otimizar o processo. A produção de carvão ativado a partir de lamas de ETAR de fábricas de celulose, utilizando diferentes agentes ativadores e condições de pirólise foi investigada por Cho & Suzuki (1980). Os resultados indicaram que a produção de carvão ativado a partir dessas lamas é viável e pode ser uma alternativa para o tratamento de efluentes e a valorização de resíduos. Rio *et al.* (2004) investigam a produção de carvão ativado a partir de lamas de águas residuais, através do processo de carbonização. Foram realizadas experiências cujos resultados indicam que o material carbonizado obtido possui propriedades promissoras para a produção de carvão ativado.

Saner *et al.* (2022) demonstraram que os resíduos da liquidação hidrotérmica de lamas de ETAR podem ser utilizados como adsorventes eficientes para a remoção de fármacos em efluentes reais. Ao comparar com o carvão ativado comercial, os resultados mostraram que os novos adsorventes foram capazes de reduzir as concentrações dos fármacos para abaixo do limite de detecção. Essa abordagem representa uma solução sustentável para a valorização de lamas, gerando tanto nutrientes quanto

materiais para o tratamento avançado de águas residuais. Foi demonstrado por Edet & Ifelebuegu (2020) que resíduos de tijolos reciclados podem ser utilizados como adsorventes eficientes para a remoção de fosfatos em águas residuais. A eficiência do processo foi influenciada por diversos fatores, como a quantidade de adsorvente e a temperatura. Estudos termodinâmicos confirmaram a viabilidade e a espontaneidade da adsorção, indicando que essa abordagem é uma alternativa sustentável para o tratamento de águas residuais. Maslon & Czarnota (2020) demonstraram a eficácia de materiais minerais em pó, como tijolo e ceramsita, na remoção de fósforo em águas residuais. Após a adsorção, esses materiais podem ser reutilizados como fertilizantes, transformando resíduos em recursos valiosos e reduzindo custos. Essa abordagem representa uma solução sustentável para o tratamento de águas residuais e a gestão de resíduos.

Yasipourtehrani *et al.* (2021) avaliaram a eficiência da escória de alto forno na remoção de corantes em águas residuais. Foram investigadas duas amostras de escória, identificando as condições ótimas para o tratamento. Os resultados demonstram o potencial da escória como adsorvente de baixo custo para o pré-tratamento de efluentes industriais, reduzindo a necessidade de adsorventes mais caros, como o carvão ativado.

### 4.3 ELETROCOAGULAÇÃO

#### 4.3.1 Tratamento de águas residuais

Omran *et al.* (2021) compararam a sustentabilidade de diversas tecnologias de tratamento de águas residuais em estações do Iraque, utilizando uma análise multicritério. Os resultados indicaram que o sistema reator biomembrana obteve a melhor pontuação, seguido por valas de oxidação, lagoas de aeração e tratamento convencional. A dimensão ambiental destacou-se como a mais importante na avaliação, reforçando a necessidade de soluções mais sustentáveis para o tratamento de águas. Butler *et al.* (2011) realizaram uma revisão da literatura, publicada entre 2008 e 2010, sobre o tratamento eletroquímico de águas residuais. A EC destacou-se como um método eficiente, comparável ou superior aos métodos convencionais, na remoção de poluentes como cor e carência química e bioquímica de oxigênio. A EC oferece vantagens como rapidez, baixo custo e versatilidade, sendo aplicável a diversos tipos de efluentes. As pesquisas futuras devem procurar otimizar o processo e desenvolver modelos matemáticos para prever a sua eficiência. Zheng *et al.* (2017) afirmam que o tratamento de efluentes com poluentes recalcitrantes representa um grande desafio. A eletroquímica tem se destacado como uma tecnologia promissora devido à sua eficiência e baixo impacto ambiental. A sua análise bibliométrica revela um crescente interesse na área, com foco no desenvolvimento de novos materiais anódicos. A

China e os Estados Unidos lideram a pesquisa, com o *Journal of the Electrochemical Society* sendo a principal publicação.

Ebba *et al.* (2021) confirmaram a eficácia da eletrocoagulação (EC) no tratamento de águas residuais, removendo com sucesso cor, matéria orgânica e turbidez. O estudo demonstrou que a otimização dos parâmetros operacionais é fundamental para maximizar a eficiência do processo e reduzir os custos. A EC destaca-se como uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes, oferecendo baixo custo e menor produção de resíduos. Jing *et al.* (2020) apresentam águas residuais da mineração de chumbo e zinco, com alta carência química de oxigênio que foram tratadas, pela primeira vez, por EC. Os resultados mostraram uma redução de 82,8% da carência química de oxigênio e melhorias na recuperação de minerais, demonstrando o potencial da EC para o tratamento e reutilização dessas águas na indústria de mineração.

Kamyab *et al.* (2022) destacam a produção de grandes volumes de efluentes agrícolas que exigem tratamentos eficientes. A EC mostra-se promissora, removendo mais de 80% da matéria orgânica, com fatores como materiais dos eletrodos e densidade de corrente, a influenciar o desempenho. A combinação com outros métodos pode otimizar os resultados, e a análise do consumo de energia indica a viabilidade econômica da EC para o tratamento de efluentes agrícolas. Llanos *et al.* (2017) demonstraram a eficácia da EC com ânodos de alumínio tanto no tratamento de água para consumo humano quanto na reutilização de efluentes urbanos. A técnica mostrou-se particularmente eficaz na remoção de turbidez e matéria orgânica, com resultados variáveis conforme a composição de cada efluente.

Marmanis *et al.* (2022) destacam a ausência de tratamento de esgoto adequado em pequenas ilhas como um problema ambiental. No seu estudo, avaliam a EC para o tratamento de águas residuais numa comunidade grega. Os resultados indicam que a EC é eficaz na redução da carência química de oxigênio, sendo que parâmetros como corrente, tempo de tratamento e tipo de eletrodo influenciam a sua eficiência. A energia solar mostrou-se uma alternativa promissora para a operação do sistema, reduzindo custos e o impacto ambiental. Cid *et al.* (2018) desenvolveram e testaram protótipos de sistemas de saneamento autônomo baseados em eletroquímica para regiões com acesso limitado a saneamento. Esses sistemas, compactos e portáteis, tratam fezes e urina, desinfetando a água e reduzindo a carga de poluentes. Foram testados em diferentes locais do mundo, demonstrando eficiência e baixo consumo de energia. A água tratada pode ser reutilizada para descarga em sanitários.

Sher *et al.* (2020) compararam a eficácia de diferentes técnicas eletroquímicas, como a EC, no tratamento de efluentes de uma estação piloto. A EC, utilizando eletrodos de alumínio e ferro, mostrou-se eficaz na remoção de carência química de oxigênio, sólidos suspensos e micropoluentes. A densidade de corrente emergiu como o principal fator influenciando a eficiência do processo, com os eletrodos de alumínio demonstrando melhor desempenho na formação de flocos e bolhas. A EC é destacada como

uma técnica promissora para o tratamento de águas residuais por Tahreen *et al.* (2020). A sua revisão aborda os avanços recentes da EC, enfatizando a importância da otimização dos parâmetros operacionais e a combinação com outras tecnologias para aumentar a eficiência. A EC-membrana destaca-se como uma tecnologia híbrida com grande potencial, oferecendo alta eficiência e menor produção de resíduos. Uludag-Demirer *et al.* (2020) testaram diferentes combinações de eletrodos de ferro e alumínio na EC para tratar efluentes de digestão anaeróbica. A configuração com ambos os eletrodos de ferro mostrou-se a mais eficaz, removendo com sucesso turbidez, carência química de oxigênio, fósforo total e microrganismos. Apesar do maior consumo energético, a EC destaca-se por seu baixo custo operacional, curto tempo de retenção e simplicidade, tornando-a uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes.

Elkhatib *et al.* (2021) demonstraram a alta eficiência da EC na remoção de microplásticos de poliéster, tanto em soluções sintéticas quanto em águas residuais reais. Ao variar parâmetros como pH e densidade de corrente, os autores obtiveram taxas de remoção superiores a 99% em soluções sintéticas e de 96,5% em águas residuais, com redução significativa de outros contaminantes. O processo mostrou-se economicamente viável, sob determinadas condições operacionais. A dificuldade de tratar efluentes contaminados por diazodinitrofenol (DDNP), um composto altamente tóxico e persistente foi destacada por Zhai *et al.* (2013). A revisão realizada pelos autores avalia diversas tecnologias de tratamento, como oxidação supercrítica, eletrocatalise e biodegradação, procurando identificar um método eficiente e sustentável para a remoção do DDNP. Yao *et al.* (2022) desenvolveram um processo eletroquímico eficiente para tratar águas residuais, removendo carência química de oxigênio e nitrogênio total, otimizando as condições operacionais para maximizar a eficiência da remoção de nitrogênio. Em águas residuais farmacêuticas reais, conseguiram eliminar 79,1% de carência química de oxigênio e 87% do nitrogênio total, em 120 minutos, sem formação de subprodutos tóxicos.

Hand & Cusick (2021) destacam a desinfecção eletroquímica como uma alternativa promissora aos métodos tradicionais, gerando oxidantes *in situ* por meio de reações eletroquímicas. A sua revisão analisa o impacto do contexto de tratamento, a seleção de oxidantes e as práticas operacionais no desempenho desses sistemas, discutindo o consumo de energia e apresentando aplicações e estratégias de otimização. Os processos eletroquímicos são uma alternativa versátil e eficiente para o tratamento de águas e efluentes, capazes de remover uma ampla variedade de contaminantes conforme afirmam Muddemann *et al.* (2019). A revisão que apresentam abrange desde os princípios básicos até aplicações industriais, destacando a flexibilidade e a eficácia dessas tecnologias.

Shirkoochi *et al.* (2022) revêm as principais técnicas de inteligência artificial (IA) aplicadas à modelação e otimização de processos eletroquímicos, como eletro-oxidação (EO), EC, eletro-Fenton e eletrossíntese. A IA demonstrou grande potencial, mas a limitada quantidade de dados em muitos estudos levanta questões sobre a confiabilidade dos modelos. O seu trabalho discute estratégias para

melhorar o desempenho e a robustez desses modelos, destacando o potencial da IA para otimizar processos eletroquímicos. A eficácia da radiação gama na desinfecção e melhoria da qualidade de efluentes de uma ETAR, reduzindo significativamente coliformes, carência química e bioquímica de oxigênio, turbidez e nutrientes foi demonstrada por Lajayer *et al.* (2020). A eficácia na desinfecção de lamas foi menor. A radiação gama mostra-se promissora para o tratamento de efluentes com vista à sua reutilização agrícola.

#### 4.3.2 Processos combinados

Ajmi *et al.* (2018) propuseram um tratamento integrado para efluentes industriais combinando oxidação de *Fenton* e biodegradação por fungos. O processo otimizado removeu eficientemente diversos parâmetros, como carência química de oxigênio, álcool polivinílico (PVA) e cor. Análises enzimáticas e de metabólitos confirmaram a biodegradação, resultando num efluente de alta qualidade. A combinação de biomassa granular de cinzas volantes (BGCV) com o processo de *Fenton* para tratar efluentes de branqueamento de polpa foi avaliada por Ribeiro *et al.* (2023). A sequência *Fenton*-BGCV mostrou-se mais eficaz na remoção de halogênios orgânicos e na melhoria da biodegradabilidade. A utilização da própria água residual na granulação da biomassa reduziu o consumo de água, e a reutilização da BGCV sem regeneração mostrou-se economicamente viável. O potencial dos processos eletroquímicos híbridos, combinando a EC e a EO, para tratar águas residuais foi constatado por Asfaha *et al.* (2021). Enquanto a EC aglutina partículas, a EO degrada compostos orgânicos. Essa combinação aumenta a eficiência na remoção de diversos contaminantes. A sua revisão aborda os princípios, aplicações e perspectivas desse processo híbrido.

Bazrafshan *et al.* (2022) investigaram a eficácia da combinação de coagulação química e eletro-*Fenton* para o tratamento de efluentes de matadouros. Através da otimização das condições operacionais, foi alcançada alta eficiência na remoção de contaminantes. Os resultados demonstram o potencial dessa tecnologia para o tratamento de águas residuais do setor de abate, contribuindo para a proteção ambiental. A importância do tratamento eficaz de efluentes da indústria de pesticidas foi destacada por Bhagawan *et al.* (2018). Devido à toxicidade desses efluentes, os autores investigaram a combinação de processos eletroquímicos, como a EC e a EO, com outras tecnologias avançadas para um tratamento mais eficiente. A combinação de cavitação hidrodinâmica (CH) e processo *Fenton* heterogêneo para o tratamento de efluentes industriais foi investigada por Chakinala *et al.* (2009). O efeito de diversos parâmetros operacionais sobre a mineralização foi avaliado. A abordagem de utilização da cavitação como pré-tratamento, mostrou-se eficaz na remoção de carbono orgânico total, reduzindo os custos operacionais. Hallmann *et al.* (2012) demonstraram que a combinação sequencial de processos *Fenton* e degradação aeróbica é eficaz para tratar águas residuais complexas, como as

provenientes de remediação de solo. Essa combinação maximizou a remoção da carência química de oxigênio e surfactantes, evidenciando a sinergia entre os processos.

Yu *et al.* (2020) apresentam uma revisão com resumo de 187 estudos publicados em 2019 sobre processos físico-químicos de tratamento de águas residuais. A análise abrange processos físicos (adsorção, filtração e flotação) e químicos (coagulação/floculação, oxidação avançada, eletroquímicos, desionização e troca iônica), fornecendo um panorama completo dos principais avanços da área.

### 4.3.3 Processos de oxidação avançada

Deng & Zhao (2015) verificam que os Processos de Oxidação Avançada (POA) são uma tecnologia promissora para tratar águas residuais, especialmente as que contêm contaminantes resistentes. A produção de radicais altamente reativos, como hidroxila e sulfato, permite a degradação de diversos poluentes. O artigo revê os mecanismos de produção de radicais nos POA e as suas aplicações em lixiviados e efluentes. A eficiência dos POA depende de vários fatores, incluindo o tipo de processo, os poluentes e as condições operacionais. Além da oxidação por radicais, outros mecanismos também contribuem para a remoção de poluentes. A crescente preocupação com a presença de compostos de preocupação emergente em ambientes aquáticos tem impulsionado a pesquisa por novas tecnologias de tratamento de águas residuais conforme alertam Bermúdez *et al.* (2021). Esta revisão aborda o potencial dos POA para a degradação destes compostos, que são resistentes aos tratamentos convencionais, com o objetivo de apresentar uma visão geral dos diferentes POA e dos seus mecanismos de ação, destacando a sua importância para a proteção dos recursos hídricos.

Dong, Chen, *et al.* (2022) referem as vantagens dos microrreatores na otimização de POA, como maior eficiência em transferência de massa e calor. A revisão aborda os avanços recentes na aplicação de microrreatores em POA para tratamento de água, discutindo design, materiais e técnicas. Desafios como a compreensão dos mecanismos em escala microscópica e aplicação à escala real são abordados, com propostas para expandir o uso industrial de microrreatores em POA. A eficácia do processo de *Fenton* em leito fluidizado para remover o pesticida imidaclopride, um sério contaminante da água é demonstrada por Lacson *et al.* (2018). O estudo otimiza as condições do processo e identifica os principais intermediários de degradação, mostrando a alta eficiência do método. A eficácia de um sistema integrado para tratar águas residuais da indústria de laticínios, combinando um reator eletro-*Fenton* e um reator biológico de leito sequencial (SBR) foi avaliada por Heidari *et al.* (2021). O eletro-*Fenton*, como pré-tratamento, facilita a biodegradação no SBR, resultando em altas remoções de poluentes. Pérez *et al.* (2018) desenvolveram um reator eletroquímico inovador, com uma célula microfluídica de fluxo contínuo, que oferece alta eficiência e baixo consumo energético. A configuração do reator, com estreito espaçamento entre os elétrodos, otimiza a transferência de massa e a remoção de

contaminantes como a clopiralida. A eficácia de um reator biológico de leito móvel (MBBR) combinado com a formação de óxidos de manganês biogênicos (BioMnOx) para remover micropoluentes em efluentes de ETAR foi demonstrada por Wang *et al.* (2022). O sistema BioMn-MBBR mostrou-se superior ao MBBR convencional, especialmente na remoção de diclofenaco e sulfametoxazol. A formação de BioMnOx nos biofilmes foi crucial para a oxidação e adsorção. A eficiência do processo, embora influenciada pela composição do efluente, destaca o potencial do BioMn-MBBR para tratamento avançado de águas residuais.

Feijoo *et al.* (2023) expõem que a preocupação com a contaminação por compostos emergentes tem impulsionado o uso de POA. A sua revisão aborda os principais métodos de formação de radicais oxidantes, como hidroxila, sulfato, cloro e iodo, discutindo vantagens, desvantagens, mecanismos e aspetos ambientais e económicos, com o objetivo de auxiliar na seleção e aplicação de POA, em diferentes cenários. A necessidade de tratar águas contaminadas por compostos orgânicos recalcitrantes é salientada por Gopalakrishnan *et al.* (2023). A sua revisão aborda o estado da arte dos POA e as suas combinações com tratamentos biológicos, discutindo diferentes configurações de reatores fotocatalíticos e a importância da integração de tecnologias. A sua revisão também destaca os desafios e oportunidades para sistemas de tratamento mais eficientes e sustentáveis. Guerra-Rodríguez *et al.* (2018) evidenciam que a preocupação com micropoluentes em águas residuais impulsiona o uso de POA baseados em radicais sulfato. A revisão aborda métodos de ativação de persulfato e peroximonossulfato, aplicações, integração com ultrafiltração e desafios para a implementação em escala real.

Jawad *et al.* (2016) salientam a importância de novas tecnologias para tratar águas residuais contaminadas, impulsionando a pesquisa em POA. O processo *Fenton* ativado por bicarbonato tem se mostrado eficaz na degradação de compostos orgânicos. A sua revisão aborda as recentes aplicações desse processo em sistemas homogêneos e heterogêneos, destacando a sinergia entre peróxido de hidrogénio e bicarbonato. A adição de bicarbonato aumenta a eficiência da degradação, estabiliza catalisadores e reduz subprodutos. É evidenciado por Krishnan *et al.* (2017) que a escassez hídrica impulsiona a busca por tratamentos de água mais eficientes. Os POA emergem como uma tecnologia promissora para a remoção de poluentes orgânicos recalcitrantes, utilizando radicais hidroxila para mineralizar os poluentes. Este artigo apresenta uma visão geral dos POA, dos seus mecanismos e dos custos envolvidos na sua implementação. Kurian (2021) alerta para a necessidade de soluções mais eficientes para o tratamento de efluentes, devido à escassez hídrica e à poluição. Os POA, com o uso de nanomateriais, emergem como uma alternativa promissora para a degradação completa de contaminantes recalcitrantes. A revisão aborda os principais POA e os avanços recentes no uso de nanomateriais. A figura seguinte foi extraída e adaptada do seu artigo.

Lin *et al.* (2021) assinalam a necessidade de tratar o PVA, um poluente emergente. Os POA são promissores para degradar o PVA, mas a sua modelação é complexa. Esta revisão aborda métodos de

degradação do PVA, com foco nos POA, e discute a importância da modelação dinâmica para o controle desses processos. Um novo POA híbrido para a degradação de 1,4-dioxano de águas residuais é apresentado por Sonawane *et al.* (2022). A ativação do persulfato mostrou-se eficaz, aumentando a taxa de reação e reduzindo o consumo de energia. A injeção em duas etapas do persulfato otimizou o processo, permitindo a degradação completa do contaminante, em 120 minutos. Este método é uma alternativa promissora aos métodos térmicos convencionais. Tsydenova *et al.* (2015) avaliam a capacidade dos POA solares em remover simultaneamente patógenos e poluentes químicos em água. Esses processos demonstram potencial para tratar águas contaminadas, especialmente em regiões com limitações de infraestrutura. No entanto, a complexidade das matrizes de água e a competição por radicais podem afetar a eficiência. A otimização de parâmetros como concentração de catalisadores e pH é crucial.

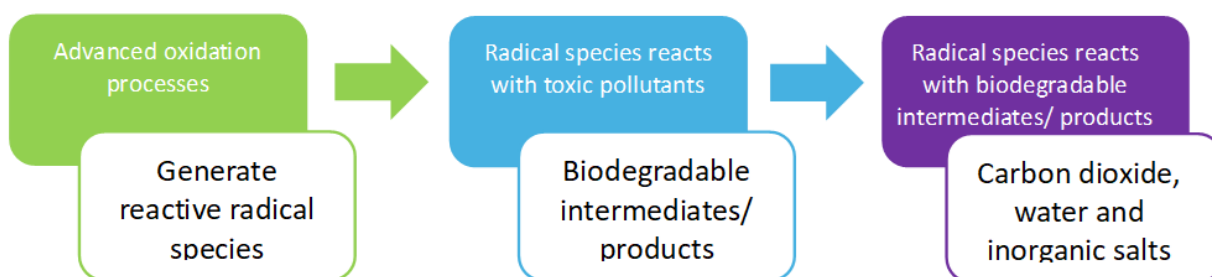


Figura 50 - Diagrama esquemático dos processos envolvidos em POA  
 Fonte: Adaptado de Kurian, (2021)

Brosler *et al.* (2023) transmitem a importância dos processos eletroquímicos de oxidação avançada (PEOA) para o tratamento de águas residuais. A EO anódica com elétrodos de diamante impregnado com boro mostra-se altamente eficiente na degradação de poluentes. A revisão sistemática da literatura realizada pelos autores avalia a sinergia entre essa técnica e outros métodos de oxidação. A combinação dessas abordagens potencializa a degradação e mineralização de poluentes, tornando os PEOA com diamante impregnado com boro uma alternativa promissora. A integração com fontes renováveis e a continuidade das pesquisas são essenciais para a aplicação em larga escala. O potencial do biocarvão em PEOA para tratamento de águas residuais é comprovado por Jiang *et al.* (2023). A sua revisão bibliométrica demonstra o crescente interesse nessa área, com a China liderando as pesquisas conjuntas. O foco inicial foi na produção de peróxido de hidrogénio, mas o processo eletro-Fenton tem se destacado. O biocarvão atua como elétrodo ou eletrocatalisador e a sua capacidade de adsorção complementa os PEOA. As perspectivas futuras incluem a aplicação do biocarvão em novos PEOA e a otimização de sistemas combinados para tratamento de águas complexas. Wei *et al.* (2020) lembram a eficácia da combinação de processos de separação por membrana e PEOA no tratamento de água. Essa combinação pode ser realizada em etapas sequenciais ou num único sistema integrado. A integração

dessas tecnologias oferece vantagens como maior eficiência na remoção de poluentes e menor consumo de energia, sendo promissora para o tratamento de águas residuais.

Ding *et al.* (2014) desenvolveram um sistema inovador de tratamento de águas residuais, combinando duas células eletroquímicas. Essa configuração de duas células permitiu uma maior eficiência na degradação de corantes e remoção de matéria orgânica, graças à otimização da produção e consumo de peróxido de hidrogénio. Os resultados demonstram o potencial dessa tecnologia. A eficácia do processo foto-*Fenton*, utilizando luz solar concentrada, para a degradação de surfactantes em águas residuais industriais é demonstrada por Orlandi *et al.* (2019). Obtiveram altas taxas de remoção em curto tempo, tanto em condições homogêneas quanto heterogêneas, abrindo caminho para o desenvolvimento de um processo de tratamento de águas residuais de baixo custo e alta eficiência que pode ser aplicada em ETAR ou em pequenas e médias empresas. Hussain *et al.* (2021) apontam a necessidade de inovações nos processos de tratamento de água para lidar com a complexidade dos efluentes atuais. Os processos *Fenton* heterogêneos, combinando metais de transição e peróxido de hidrogénio, emergem como uma alternativa promissora para a degradação de compostos orgânicos. A revisão avalia o desempenho de diferentes catalisadores metálicos, indicando que o manganês é o mais eficiente, seguido pelo cobre, sendo que a facilidade de aplicação favorece o cobre.

Johnson & Mehrvar (2022) alertam para os desafios do tratamento combinado de efluentes vinícolas em ETAR municipais. Os autores avaliaram a eficácia de um pré-tratamento tipo *Fenton* para melhorar esse processo. Embora os resultados tenham sido promissores na redução de sólidos suspensos, o estudo identificou limitações para otimizar o tratamento combinado em ETAR. A eficácia da coagulação com cloreto de polialumínio (PAC) e dos processos de oxidação *Fenton* e foto-*Fenton* no tratamento de efluentes industriais é comparada por Metin & Çifçi (2023). A coagulação mostrou-se mais eficiente na remoção de sólidos, enquanto a oxidação *Fenton* contribuiu para um tratamento mais completo. A adição de luz ao processo *Fenton* não trouxe benefícios significativos. Os autores recomendam avaliar a toxicidade das águas tratadas. Papoutsakis *et al.* (2015) avaliaram o uso do ácido etilenodiamino-N, N-dissuccínico (EDDS) como quelante de ferro no tratamento foto-*Fenton* de efluentes municipais, com pH próximo ao neutro. Experiências em laboratório e num reator solar demonstraram a eficácia do processo, com altas taxas de degradação de contaminantes orgânicos. A otimização das condições operacionais permitiu identificar a concentração ideal dos reagentes.

Pérez *et al.* (2019) desenvolveram um novo reator eletro-*Fenton* com alta eficiência e baixo custo, combinando um ventilador de jato e uma célula microfluídica. Essa configuração inovadora promove a produção de peróxido de hidrogénio e a degradação de compostos orgânicos, como a clopiralida, de forma rápida e eficiente. Os resultados demonstram o potencial dessa tecnologia para o tratamento de águas residuais. Raji & Mirbagheri (2021) mapearam as principais tendências em POA baseados em *Fenton* para tratar águas residuais de setores como têxtil, farmacêutico e de aterros. A sua análise

bibliométrica identificou o desenvolvimento de novos catalisadores e a exploração de combinações como foto-*Fenton* e eletro-*Fenton* como as áreas mais promissoras. Os resultados podem guiar futuras pesquisas e aplicações industriais. Os avanços recentes nos processos de *Fenton* para tratamento de efluentes industriais, com foco em catalisadores heterogêneos e na sua regeneração são abordados por Ribeiro & Nunes (2021). Analisam estudos da última década, identificando a procura por novos materiais e a otimização de processos como principais tendências. Os desafios incluem a determinação da vida útil dos catalisadores e a melhor integração dos processos de *Fenton* em ETAR. Villegas-Guzman *et al.* (2017) propõem um novo processo de foto-*Fenton* utilizando ferro mineral e aditivos naturais para o tratamento de águas residuais. A adição de ácidos orgânicos, como ácido cítrico e tartárico, potencializou a eficiência do processo na inativação de *escherichia-coli*, e a remoção de micropoluentes e matéria orgânica. O sumo de limão mostrou-se um aditivo promissor.

Ziembowicz & Kida (2022) recordam que a escassez hídrica e a poluição exigem soluções inovadoras. Os processos *Fenton*, apesar de promissores, apresentam limitações. A sua revisão aborda as características, vantagens e desvantagens do processo *Fenton* clássico e discute sua aplicação na remoção de poluentes orgânicos, especialmente micropoluentes. Além disso, explora novas abordagens para otimizar o processo *Fenton* e integrá-lo às tecnologias de tratamento de água existentes. Pervez *et al.* (2020) desenvolveram um novo catalisador heterogêneo à base de óxido de ferro e óxido de grafeno, ativado por persulfato, para a degradação de corantes em águas residuais. O sistema mostrou alta eficiência e estabilidade, removendo completamente do corante rodamina azul em condições otimizadas. Os resultados indicam que essa tecnologia é promissora para o tratamento de efluentes industriais. O potencial de substâncias biossolúveis em água (SBO) para o tratamento de águas residuais foi investigado por Gomis *et al.* (2015). As SBO mais hidrofílicas mostraram-se mais eficientes na degradação de contaminantes emergentes, sem registo de efeitos negativos devidos à sua utilização.

Kumar *et al.* (2020) realizaram uma revisão abrangente sobre a utilização de catalisadores heterogêneos em processos *Fenton* para o tratamento de efluentes. Os autores exploraram diferentes métodos de preparação, modificação e caracterização desses catalisadores, com foco na eficiência da degradação de compostos orgânicos. A sua revisão destaca a importância de otimizar as condições operacionais, como pH e temperatura, para maximizar o desempenho dos catalisadores. A lixiviação de metais em catalisadores é um problema comum nos tratamentos de águas residuais conforme demonstram Li *et al.* (2016). Para superar esse desafio, desenvolveram um catalisador de cobre e cobalto estabilizado em meio alcalino, com tampão de bicarbonato, que mostrou alta eficiência na degradação de fenol e menor perda de metais. Estudos mecanísticos indicam que a degradação ocorre por meio da ação de radicais superóxidos e hidroxila.

Qu *et al.* (2024) propuseram um novo fotocatalisador heterojunção de carbonato de bismuto/óxido de bismuto-cobre para superar as limitações da fotoativação tradicional do peróxido de hidrogénio. Este

material demonstrou alta eficiência na degradação de poluentes orgânicos e complexos de metais pesados sob luz infravermelha próxima, expandindo o espectro de aplicações do peróxido de hidrogênio no tratamento de águas residuais. Starling *et al.* (2021) investigaram a fotocatalise solar como método para eliminar bactérias e genes resistentes a antibióticos em efluentes de ETAR. Embora o processo foto-Fenton solar tenha se mostrado promissor, a remoção de genes apresentou resultados variáveis, influenciados por fatores como irradiação, matriz do efluente e adição de compostos como o grafeno. Os autores destacam a necessidade de estudos em matrizes reais e a investigação de mecanismos como mutação e remoção de genes livres. A eficácia da oxidação húmida e da oxidação húmida catalítica para tratar efluentes de refinarias ricos em metildiethanolamina é avaliada por González *et al.* (2023). Coques ativados de petróleo, utilizados como catalisadores, demonstraram alta eficiência na remoção da metildiethanolamine e outros parâmetros como a carência química de oxigênio e o carbono orgânico total. O processo catalítico permitiu operar em condições mais suaves e aumentou a biodegradabilidade dos efluentes.

Crousier *et al.* (2016) avaliam a eficiência da ozonização catalítica na remoção de matéria orgânica recalcitrante. Os resultados demonstraram que a combinação da ozonização com o catalisador granular promoveu uma maior remoção de carbono orgânico dissolvido em comparação com a ozonização simples, indicando a sinergia entre os processos de adsorção e oxidação. A cinética de degradação foi modelada com sucesso, permitindo uma melhor compreensão do processo. Shangguan *et al.* (2018) referem que a ozonização é uma técnica promissora para o tratamento de água, mas a sua eficiência é limitada pela baixa solubilidade do ozono. A tecnologia de microbolhas, ao melhorar a transferência de massa gás-líquido, potencializa a ozonização, tornando-a mais eficiente para a oxidação de matéria orgânica tanto em água potável quanto em efluentes.

Yang & Hoffmann (2016) desenvolveram novos elétrodos de nanotubos de dióxido de titânio azul-escuro, com alta estabilidade e atividade para tratamento de efluentes. Operando em modo bipolar, esses elétrodos geram eficientemente radicais hidroxila, minimizando subprodutos e com longa vida útil. Zhang *et al.* (2021) propõem um novo ânodo de duas camadas para tratamento descentralizado de águas residuais por oxidação eletroquímica. Com maior durabilidade e menor lixiviação de antimônio, esse ânodo supera os comerciais, gerando eficientemente radicais hidroxila e ozono para a degradação de compostos orgânicos e desinfecção, inclusive em efluentes complexos. É destacado por Chen *et al.* (2022) que a crescente poluição por compostos orgânicos impulsiona a busca por novas tecnologias de tratamento. A combinação do persulfato ativado com microeletrólise de ferro-carbono (Fe-C/PS) mostra-se promissora devido à sua alta eficiência e baixa formação de subprodutos. A revisão aborda o mecanismo, fatores influentes e aplicações da Fe-C/PS. A otimização de parâmetros, desenvolvimento de novos catalisadores e expansão das aplicações são as principais direções futuras. O impacto ambiental de diferentes fontes de energia em processos eletrolíticos foi avaliado por Fernández-Marchante *et al.*

(2021). Um inventário de três instalações piloto mostrou que a origem da energia influencia significativamente os riscos ambientais. A análise de ciclo de vida revelou que a energia da rede elétrica, especialmente a não renovável, gera maior impacto, enquanto fontes como solar e eólica são mais sustentáveis. A matriz energética local é crucial para a sustentabilidade dessas tecnologias.

Heim *et al.* (2015) investigam a eficácia de um eletrodo de diamante impregnado com boro na inativação de bactérias em água potável e efluente de ETAR. A eletrólise, influenciada pela densidade de corrente e pela concentração de ozono, levou à inativação completa de *escherichia-coli*, *Enterococcus faecium* e *Pseudomonas aeruginosana* em água potável. No efluente, a matriz complexa afetou a eficiência da desinfecção por ozono, diminuindo-a. A eficácia da eletrólise com membranas de troca iônica no tratamento de águas residuais de latrinas é demonstrada por Yang *et al.* (2019). A combinação dessas membranas reduziu significativamente o consumo de energia, a formação de subprodutos nocivos e aumentou a remoção de contaminantes como matéria orgânica, amônia, ovos de helmintos e fósforo. A produção de hidrogênio na célula catódica torna o processo mais sustentável, e a recuperação de nutrientes como nitrogênio e fósforo permite sua reutilização como fertilizantes.

Liu *et al.* (2022) destacam os desafios do tratamento de águas residuais complexas de indústrias como papel, têxtil e farmacêutica por métodos convencionais. A EO surge como uma alternativa promissora, sendo um processo limpo e eficiente. A revisão aborda diferentes configurações de reatores eletroquímicos, comparando as suas vantagens e desvantagens. Os reatores aperfeiçoados demonstram potencial para aplicação industrial. Discutem-se as perspectivas futuras da EO no tratamento de águas residuais orgânicas refratárias. É abordado por Mancuso *et al.* (2020) que a CH se tem mostrado uma ferramenta promissora no tratamento de águas residuais. O seu artigo apresenta uma revisão crítica da literatura sobre CH, abordando os seus princípios básicos, mecanismos de degradação de poluentes e a influência de diversos parâmetros. Além disso, são discutidas as sinergias da CH com outras tecnologias e os métodos para avaliar a sua eficácia, destacando-se a importância da modelação matemática para a otimização de sistemas de CH. Dong *et al.* (2019) referem que a contaminação por metais pesados nos recursos hídricos é uma grave ameaça à saúde. O ferrato (VI) surge como uma alternativa promissora para o tratamento de águas contaminadas, demonstrando alta eficiência na remoção de metais tóxicos. A sua revisão aborda os mecanismos de interação entre o ferrato (VI) e metais tóxicos, além de discutir os fatores que influenciam a eficiência do tratamento, apresentando os desafios e perspectivas futuras para a aplicação do ferrato (VI) no tratamento de águas residuais.

### 4.3.4 Tratamento de efluentes de indústrias

Ahmed *et al.* (2018) avaliam a eficiência de um novo reator de EC com ânodo rotativo, para o tratamento de efluentes têxteis. Os resultados demonstraram que a configuração adotada superou os

modelos convencionais, alcançando alta remoção de cor, carência biológica e química de oxigênio, turbidez e sólidos suspensos totais em menor tempo. Este reator oferece um método mais eficiente e rápido para o tratamento de águas residuais industriais. Foi analisado por Bidu *et al.* (2021) o tratamento de efluentes têxteis na Tanzânia. A pesquisa identificou os principais poluentes, características dos efluentes e as tecnologias utilizadas, constatando que a maioria das empresas possui estações de tratamento, mas os efluentes ainda não cumprem os padrões de qualidade. Bilinska & Gmurek (2021) alertam para a complexidade da poluição hídrica da indústria têxtil, que vai além da cor. A sua revisão destaca a necessidade de um tratamento mais aprofundado, incluindo a degradação de corantes e subprodutos. Os autores exploram o potencial dos POA catalisados, enfatizando a importância de eliminar compostos orgânicos recalcitrantes e evitar a formação de novos poluentes. Castillo-Suárez *et al.* (2023) confirmam que a indústria têxtil dos tecidos de ganga gera efluentes altamente poluídos. A revisão de 172 estudos revela que os POA são eficazes na remoção de corantes índigo, mas há necessidade de mais pesquisas em escala industrial e análises detalhadas sobre os impactos ambientais e econômicos. É confirmado por Sandi *et al.* (2020) que a indústria têxtil gera grandes volumes de efluentes contaminados. A EC surge como uma técnica promissora para o tratamento desses efluentes, oferecendo eficiência, economia e confiabilidade. Este artigo revê os princípios da EC, os seus parâmetros operacionais e os desafios para a sua aplicação em larga escala. Um processo eletroquímico eficiente para eliminar completamente a amônia de efluentes têxteis, convertendo-a em nitrogênio gasoso foi desenvolvido por Yao *et al.* (2019). O estudo otimizou as condições operacionais e investigou os mecanismos de reação e a viabilidade econômica do processo. Zou *et al.* (2020) alertam que a poluição por efluentes têxteis é um problema sério. Neste estudo, desenvolvem e testam um sistema bioeletro-Fenton de 20 litros para tratar corantes como o azul de metileno. Os resultados indicaram alta eficiência na remoção e mineralização do corante, demonstrando o potencial do sistema para o tratamento de águas residuais industriais em larga escala.

Apesar da legislação ambiental, Radelyuk *et al.* (2019) identificam falhas nos processos de tratamento de águas residuais em refinarias do Cazaquistão. A falta de uma metodologia unificada de monitorização permite negociações individuais, resultando numa fiscalização menos rigorosa e descargas de efluentes com níveis excessivos de poluentes. Os autores defendem a adoção de um padrão único para avaliar os poluentes nos efluentes, com vista a um tratamento mais eficiente e à proteção dos recursos hídricos. Um novo processo de tratamento de águas residuais da indústria de petróleo e gás, combinando EC com corrente alternada e biocarvão foi proposto por Lobo *et al.* (2016). Essa abordagem inovadora reduz o consumo de energia e melhora a eficiência na remoção de turbidez e sólidos suspensos. A adição de biocarvão potencializa os resultados, abrindo caminho para futuras pesquisas.

Meiramkulova *et al.* (2020) compararam a eficiência de diferentes combinações de elétrodos no tratamento de efluentes de um matadouro de aves. A combinação alumínio-grafite mostrou-se a mais

eficaz, alcançando a melhor qualidade da água. A combinação ferro-ferro apresentou os piores resultados, especialmente em relação à turbidez. Os resultados destacam a importância da escolha do material do eletrodo para o sucesso do tratamento. Cristóvão *et al.* (2015) investigam a otimização do tratamento de efluentes de uma indústria de conservas de peixe, utilizando o processo de lamas ativadas. Os parâmetros tempo de retenção hidráulica e concentração inicial de matéria orgânica foram otimizados para maximizar a remoção de carbono orgânico total. Os resultados confirmam a viabilidade do processo de lamas ativadas para o tratamento desse tipo de efluente.

Bogacki & Al-Hazmi (2017) avaliaram a eficácia do processo de *Fenton* com ferro zero valente (ZVI) e peróxido de hidrogênio no tratamento de águas residuais de oficinas mecânicas. O processo demonstrou alta eficiência na remoção de matéria orgânica, cheiro e cor, com a eficiência sendo influenciada por diversos fatores. A combinação com coagulação por cloreto de ferro mostrou potencial para melhorar ainda mais o tratamento. Tien & Luu (2020) demonstraram a eficácia da oxidação eletroquímica com eletrodo de diamante impregnado com boro no tratamento de efluentes de curtumes, superando outros eletrodos, removendo eficientemente diversos contaminantes, exceto nitrogênio total. Essa técnica mostra-se promissora para o tratamento dessas águas altamente contaminadas.

Torres-Pinto *et al.* (2023) revelam que o nitreto de carbono grafítico ( $g-C_3N_4$ ) mostrou-se um fotoeletrocatalisador eficiente para a degradação de contaminantes em efluentes. No seu estudo, otimizaram um sistema fotoeletroquímico utilizando  $g-C_3N_4$  para remover completamente diclofenaco, além de reduzir significativamente a concentração de fluoxetina e ibuprofeno. A otimização de parâmetros como distância entre eletrodos e resistividade do eletrólito foi crucial para o sucesso do processo. A reutilização do  $g-C_3N_4$  indica o seu potencial para aplicações em larga escala. A eficácia da fotodegradação, utilizando luz solar simulada e peróxido de hidrogênio, para a remoção da azitromicina em águas residuais foi demonstrada por Cano *et al.* (2020). O estudo mostrou que o processo é altamente eficiente, com quase completa remoção da azitromicina e redução significativa do carbono orgânico, além da formação de nitratos. De Witte *et al.* (2010) estudaram a ozonização da ciprofloxacina (CIP) em efluentes hospitalares, analisando a degradação do fármaco, a formação de subprodutos e a persistência da atividade antibacteriana. A sorção da CIP e a cinética de degradação foi influenciada pelo pH. A ozonização não eliminou completamente a atividade antibacteriana dos subprodutos. Foi constatado por Labrada *et al.* (2018) a presença de CIP como um contaminante persistente em ambientes aquáticos. O estudo avaliou diferentes processos de ultrassom para a degradação deste antibiótico, sendo o sono-*Fenton* o mais eficiente. Este processo promoveu a degradação completa da CIP em apenas 15 minutos e aumentou significativamente a biodegradabilidade de um efluente real. Deng *et al.* (2022) desenvolveram um sistema eletro-*Fenton* inovador com ZVI magneticamente decorado, demonstrando alta eficiência na remoção de poluentes farmacêuticos. A combinação de ZVI e eletrodo catalítico

proporcionou excelente remoção de carga orgânica, com a coagulação simultânea contribuindo para a eficiência do processo.

#### 4.3.5 Reutilização de resíduos

Bashir *et al.* (2020), perante a instabilidade nos preços do petróleo, propõem o "brown grease" como uma nova fonte promissora para a produção de biodiesel. Ao otimizar as condições de produção, os autores alcançaram um rendimento de 99,70%, demonstrando a viabilidade técnica e o potencial desta alternativa para diversificar a matriz energética. A eficácia da EC no tratamento de águas residuais de biodiesel produzido a partir de óleo de cozinha usado foi investigada por Sari-Erkan (2019). Foram avaliados os efeitos da densidade de corrente, pH e tempo de eletrólise na remoção de matéria orgânica, utilizando elétrodos de alumínio e ferro. Os resultados indicam que a EC é uma técnica promissora para o tratamento desse tipo de efluente.

## 4.4 FLOCULAÇÃO

### 4.4.1 Tratamento de águas residuais

Cai *et al.* (2019) revêm métodos de tratamento de águas residuais com amido, incluindo processos físicos, químicos e biológicos. A alta concentração e baixa toxicidade dessas águas exigem soluções eficazes. Os autores exploram a floculação, sedimentação e processos bioquímicos, procurando identificar os métodos mais eficientes e as melhores condições operacionais, considerando fatores como tipo de coagulante, dosagem e tempo de sedimentação. Um novo polímero híbrido, que foi aplicado no tratamento de águas residuais, foi sintetizado por Dawood & Li (2013). Através da otimização da dosagem do polímero e do pH, obteve-se alta eficiência na remoção de turbidez e carência química de oxigênio. Os resultados demonstram o potencial do polímero híbrido como uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuais municipais. Foi constatado por He *et al.* (2016) que o tratamento primário quimicamente melhorado, utilizando cloreto férrico de polialumínio como coagulante, mostrou-se eficaz na remoção de matéria orgânica, fósforo e sólidos suspensos em águas residuais. A otimização das condições de tratamento, como pH e tempo de sedimentação, permitiu maximizar a eficiência do processo. No entanto, a remoção de nitrogênio ainda representa um desafio.

Mian *et al.* (2018) avaliam a otimização de um SBR para o tratamento de águas residuais domésticas. Variando os tempos de reação e repouso, observaram que a pré-

coagulação/floculação/sedimentação permitiu reduzir significativamente o tempo de reação necessário para alcançar os limites de descarga, resultando num custo de operação 2,5 vezes inferior, em comparação com o sistema sem pré-tratamento. A eficácia de nanoesponjas magnéticas no tratamento de águas residuais de laticínios e suínos foi avaliada por Chhetri *et al.* (2022). Os resultados indicaram que essas nanoestruturas superaram coagulantes tradicionais na remoção de poluentes, formando flocos mais rápidos e com maior capacidade de sedimentação. A pesquisa conclui que as nanoesponjas magnéticas apresentam grande potencial para aplicação em sistemas de tratamento de águas residuais, especialmente em locais com elevada carga poluidora.

### 4.4.2 Coagulantes naturais

Nesta área Abiyu *et al.* (2018) referem o potencial da *Moringa stenopetala* como coagulante natural para tratamento de água. A proteína presente nas suas sementes é eficaz na coagulação e floculação de partículas, além de apresentar propriedades antimicrobianas. Comparada à *Moringa oleifera*, a *Moringa stenopetala* exige menores doses para obter resultados semelhantes, sendo uma opção promissora para regiões com recursos hídricos limitados. A eficácia das sementes de *Moringa oleifera* no tratamento da água do rio Sungai Baluk, na Malásia foi demonstrada por Shan *et al.* (2017). A *Moringa* reduziu significativamente bactérias e metais pesados, com eficiência de até 98%, sem alterar significativamente o pH da água. Essa planta mostra-se uma alternativa promissora e de baixo custo para o tratamento de água em países em desenvolvimento. Vigneshwaran *et al.* (2020) desenvolveram um novo coagulante biodegradável e de alto desempenho à base de quitosano carbonizado e ácido de *Moringa oleifera*, que demonstrou excelente eficiência na remoção de turbidez em diferentes tipos de água. Villaseñor-Basulto *et al.* (2018) apresentam uma revisão abrangente sobre o uso da *Moringa oleifera* no tratamento de águas residuais. O estudo destaca a eficiência do pó de sementes na remoção de turbidez e poluentes, porém ressalta a necessidade de purificação, para evitar contaminações. A combinação com coagulantes químicos pode otimizar o processo. São necessárias mais pesquisas para elucidar os mecanismos de coagulação e expandir as aplicações da *Moringa oleifera*.

Kristianto *et al.* (2019) transmitem que os extratos de sementes de *Leucaena leucocephala* são uma alternativa promissora para a coagulação de água, removendo até 99,9% da cor e gerando menos lamas que coagulantes inorgânicos tradicionais. Lugo *et al.* (2020) aludem à alta eficiência de taninos de Acácia modificados na remoção de metais pesados e parâmetros convencionais em águas residuais industriais. O processo mostrou-se robusto em diferentes pH, indicando um grande potencial para aplicação em diversas matrizes.

Chua *et al.* (2019) demonstraram que o extrato de lentilha vermelha é um coagulante natural eficaz para o tratamento de águas residuais ácidas, superando o sulfato de alumínio em termos de

eficiência na remoção de turbidez e produção de lamas. Chua *et al.* (2020) investigam extratos de lentilha, combinados com DMC, superam o sulfato de alumínio no tratamento de águas residuais agrícolas, oferecendo maior eficiência, menor produção de lamas e menor tempo de sedimentação.

Sultana *et al.* (2022) comunicam a eficácia de argilas locais, especialmente a de Patuakhali, no Bangladesh, na remoção de poluentes em águas residuais, superando coagulantes químicos tradicionais. Essa alternativa natural e acessível oferece um tratamento mais sustentável.

#### 4.4.3 Coagulantes orgânicos

Cainglet *et al.* (2020) compararam a eficácia de coagulantes orgânicos com o PAC, no tratamento de efluentes municipais. Os resultados indicaram que os coagulantes orgânicos de alto peso molecular e alta densidade de carga superaram o PAC, especialmente no tratamento de efluentes secundários. Apesar de exigirem doses maiores, os coagulantes orgânicos mostraram-se uma alternativa promissora, com benefícios como menor produção de lamas e menor impacto ambiental. A estrutura fractal de agregados de lama formados por coagulação e EC de efluentes têxteis e domésticos foi analisada por Smoczynski *et al.* (2016). A adição de polímeros orgânicos alterou as propriedades fractais desses agregados, reduzindo o número de partículas. A compreensão dessas estruturas é crucial para otimizar os processos de sedimentação e desidratação de lamas.

#### 4.4.4 Coagulantes inorgânicos

Ferreira & Waelkens (2009) compararam o PAC e o sulfato de alumínio como coagulantes, observando que ambos geram quantidades semelhantes de lamas. No entanto, a disposição das lamas de PAC em ETAR pode afetar a qualidade das lamas finais, especialmente quanto ao conteúdo de metais pesados. São necessários estudos mais aprofundados para avaliar os impactos. Pradhan *et al.* (2013) demonstraram que a combinação de coagulação com polímeros inorgânicos e desinfecção com ácido peracético (PAA) é eficaz na redução da carga microbiana em efluentes das ETAR. No entanto, a resistência de alguns patógenos ao PAA exige estudos adicionais para otimizar o tratamento. Uysal & Boyacioglu (2021) compararam a eficácia de coagulantes inorgânicos à base de titânio e zircônio com os coagulantes convencionais, como sulfato de alumínio e cloreto férrico, no tratamento de efluentes industriais. Os resultados indicaram que os novos coagulantes apresentaram desempenho similar na remoção de diversos poluentes, emergindo como promissoras alternativas para efluentes com alta carga orgânica e metais pesados.

### 4.4.5 Biofloculantes

Kolya & Kang (2023) salientam a crescente exigência por novas tecnologias de tratamento de água potável, impulsionada pela escassez hídrica. Os polímeros biodegradáveis, de baixo custo e renováveis surgem como uma alternativa promissora. O seu trabalho explora as suas aplicações na purificação da água, com foco em floculação e adsorção, e discute os desafios e oportunidades para sua implementação em larga escala. É evidenciado por Kurniawan *et al.* (2020) que os biocoagulantes e biofloculantes são uma alternativa sustentável aos coagulantes tradicionais, gerando menos resíduos e lamas biodegradáveis. A sua revisão aborda o desenvolvimento e aplicação dessas substâncias naturais no tratamento de água e efluentes. Apesar das suas vantagens, desafios como a complexidade da extração e a variabilidade dos materiais naturais ainda persistem. No entanto, o potencial de aplicação e a possibilidade de recuperação de lamas indicam um futuro promissor para essa tecnologia. Lee *et al.* (2014) demonstram o potencial dos biofloculantes de origem vegetal no tratamento de águas residuais, apesar de limitações como a capacidade de floculação e a vida útil. A alta eficiência na remoção de sólidos, turbidez e cor justifica a procura por melhorias nas suas propriedades através de modificações químicas. No entanto, a complexidade da produção, questões ambientais e custos elevados ainda representam desafios. É crescente a importância dos floculantes microbianos no tratamento de águas residuais conforme indicam Li *et al.* (2020). A sua revisão aborda os métodos de produção, mecanismos de ação e aplicações desses floculantes, além de discutir os fatores que influenciam a sua eficiência e as perspectivas futuras da tecnologia. Ajao *et al.* (2018) evidenciam o potencial dos polímeros extracelulares microbianos (EPS) produzidos em ETAR como alternativa aos floculantes sintéticos. Neste estudo, a produção de EPS em biorreatores de membrana (MBR) foi investigada em água doce e salgada. Os resultados indicaram que as EPS apresentam maior eficiência em condições semelhantes à sua produção. A produção simultânea de EPS e o tratamento de águas residuais representa uma abordagem inovadora e sustentável.

Alias *et al.* (2022) isolaram um biofloculante bacteriano altamente eficaz na remoção de sólidos em suspensão a partir de uma amostra de água do rio Langat, na Malásia. Essa nova alternativa aos floculantes químicos convencionais apresenta diversas vantagens, como biodegradabilidade e baixo impacto ambiental. Os biofloculantes, substâncias poliméricas extracelulares, produzidas por microrganismos têm-se mostrado promissores no tratamento de águas residuais. É aludido por Agunbiade *et al.* (2016) os impactos ambientais e os custos elevados dos floculantes químicos no tratamento de águas residuais. Biofloculantes produzidos por actinobactérias emergem como uma alternativa promissora devido à sua biodegradabilidade e eficiência, apesar da produção em larga escala e a otimização da capacidade de floculação ainda serem desafios a superar. Este estudo reforça a necessidade de identificar novas estirpes de actinobactérias com maior potencial para a produção de

biofloculantes de baixo custo e alta eficiência. A alta eficiência de biofloculantes produzidos pela bactéria *Bacillus sp. ISTVK1* na remoção de partículas em águas residuais é demonstrada por Gupta *et al.* (2023). A produção em meio mineral, além de mais econômica, resultou em biofloculantes com propriedades superiores. Essa alternativa biotecnológica, biodegradável e não tóxica, mostra-se promissora para o tratamento de efluentes. Tsilo *et al.* (2022) produziram um biofloculante a partir da levedura *Pichia kudriavzevii* para tratar efluentes de minas de carvão. O biofloculante mostrou-se eficaz na remoção de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio. A caracterização revelou que se trata de uma glicoproteína com atividade antibacteriana. Apesar dos resultados promissores, são necessários estudos mais aprofundados para otimizar o processo de tratamento.

Hung *et al.* (2020) reviram estudos de 2019 sobre tratamento de diversas águas residuais industriais. O quitosano destacou-se como biofloculante eficiente, enquanto floculantes à base de lignina alcalina foram eficazes na remoção de cor. Carvão ativado em pó foi utilizado para reduzir carga orgânica em efluentes químicos. Os impactos ambientais da coagulação/floculação convencional são assinalados por Lichtfouse *et al.* (2019). O quitosano, um biopolímero marinho, surge como alternativa promissora devido à sua eficiência, biodegradabilidade e segurança. No entanto, a sua viabilidade econômica em larga escala e a otimização dos processos de tratamento ainda são desafios. A caracterização do quitosano e a compreensão dos mecanismos de floculação são cruciais para maximizar o seu potencial.

Mukherjee *et al.* (2013) compararam a goma *Guar* com coagulantes inorgânicos no tratamento de efluentes da indústria da borracha. Apesar dos coagulantes inorgânicos terem apresentado ligeira vantagem na remoção de turbidez, a goma *Guar*, biodegradável e formando flocos fortes, removeu 88,2% da turbidez, mostrando-se uma alternativa promissora para reutilização da água. A crescente busca por alternativas mais sustentáveis no tratamento de águas residuais, impulsionando o uso de biofloculantes de origem vegetal é transmitida por Das *et al.* (2021). Esses biofloculantes apresentam menor impacto ambiental e maior biodegradabilidade em comparação aos produtos químicos tradicionais. O estudo faz uma revisão dos principais biofloculantes vegetais e dos seus mecanismos de ação, com destaque para a *Moringa oleifera*. A otimização dos processos de extração e aplicação ainda é um desafio para garantir a eficiência e a competitividade dessa tecnologia. A Figura 51 foi extraída do seu artigo. Makhtar *et al.* (2020) desenvolveram um novo floculante natural a partir da planta *Tacca leontopetaloides* e testaram-no em lixiviados. O biopolímero mostrou alta eficiência na remoção de turbidez, sólidos suspensos e cor. Apesar de algumas limitações, o potencial para tratamento primário de lixiviados é promissor. A importância da coagulação/floculação no tratamento de águas residuais é divulgada por Zaman (2018). Floculantes naturais como fécula de mandioca, sementes de *Plantago ovata* e *Moringa oleifera* têm-se mostrado promissores, oferecendo menor impacto ambiental e custos

reduzidos. Esses coagulantes são capazes de remover diversos poluentes, sendo que a escolha ideal depende das características do efluente.

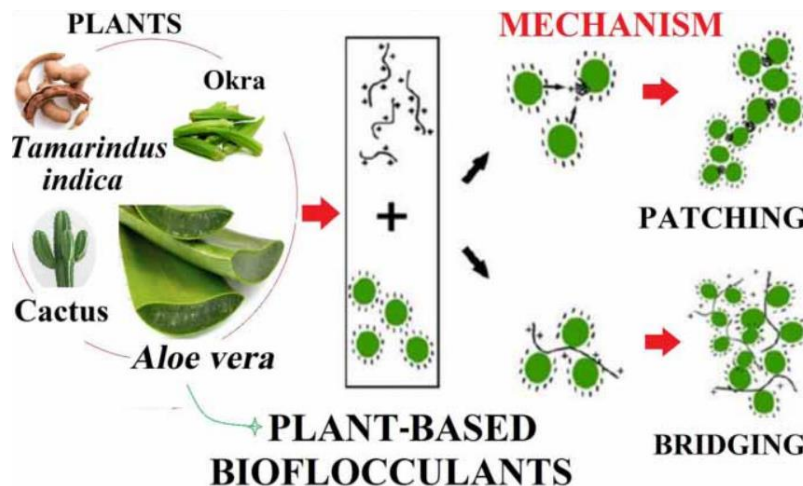


Figura 51 - Mecanismo de flocculação utilizando flocculantes à base de plantas  
 Fonte: Das *et al.* (2021)

#### 4.4.6 Tratamento de efluentes de indústrias

No âmbito do tratamento de efluentes da indústria têxtil, Aragaw & Bogale (2023) destacam que as águas residuais têxteis, com alta concentração de corantes e sólidos, representam um desafio significativo para o tratamento convencional. A coagulação/floculação emerge como uma técnica promissora para o pré-tratamento desses efluentes, visando proteger os filtros terciários e melhorar a qualidade da água. Apesar da aplicação desta técnica nas etapas iniciais do tratamento, a sua utilização como pré-tratamento para remoção de incrustações em filtros terciários ainda requer mais estudos. O potencial dos bioflocculantes na remoção de corantes em efluentes têxteis é salientado por Artifon *et al.* (2021). Biodegradáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente, os bioflocculantes são influenciados pelo pH, temperatura e natureza dos corantes. Embora promissores, exigem mais pesquisas para otimização em escala industrial. Ishak *et al.* (2020) revêm a utilização de polímeros naturais e modificados para a remoção de corantes em efluentes têxteis. Os polímeros modificados, apesar de mais caros, apresentam alta eficiência e menor impacto ambiental. A pesquisa demonstra que a modificação química dos polímeros naturais pode otimizar as suas propriedades, tornando-os uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes industriais. A condutividade elétrica complexa pode ser utilizada para otimizar a coagulação/floculação em efluentes têxteis, conforme demonstram Mortadi *et al.* (2020). Ao monitorizar essa propriedade, foi possível determinar a dosagem ideal de polímero catiónico para formar flocos estáveis. A análise dos dados revelou uma correlação entre as variações da condutividade e a

evolução do processo de agregação das partículas, evidenciando a importância da dosagem correta para evitar problemas como a desfloculação.

Park *et al.* (2018) avaliaram a reciclagem de lamas e a dosagem de floculante aniônico no tratamento de efluentes minerais, num contexto de escassez hídrica. Os resultados indicam que a combinação dessas estratégias promove a formação de flocos maiores e mais estáveis, melhorando a desidratação e reduzindo o consumo de floculante. Essa abordagem representa uma alternativa mais sustentável e econômica para o tratamento desses efluentes. Boguniewicz-Zablocka *et al.* (2020) compararam a eficiência de diferentes coagulantes na remoção da demanda química de oxigênio em efluentes da indústria do papel, procurando identificar o coagulante mais eficaz e econômico para pré-tratamento. Os resultados indicaram que o PAC apresentou a maior eficiência, mas o PAX, outro coagulante de alumínio, mostrou-se mais promissor em termos de custo-benefício. A reutilização da água tratada na produção de polpa foi explorada como estratégia para reduzir o consumo de água doce.

#### 4.4.7 Reutilização de resíduos

Kyrii *et al.* (2020) desenvolveram coagulantes a partir de lama vermelha para tratar efluentes têxteis. Esses coagulantes, compostos por ferro, alumínio e titânio, superaram o cloreto de ferro comercial na remoção de corantes. O estudo propõe um sistema fechado, combinando coagulação e adsorção, para reutilização da água, reduzindo o impacto ambiental e valorizando a lama vermelha. Li *et al.* (2009) investigaram um coagulante complexo a partir de cinzas volantes, combinando polímeros de sulfatos de alumínio e ferro. Simultaneamente, o dióxido de enxofre foi removido dos gases de combustão. A eficiência do processo foi influenciada por diversos fatores, como temperatura e tempo de reação. O coagulante mostrou-se eficaz na remoção de sólidos e turbidez em águas residuais. Embora a produção de resíduos seja uma preocupação, os silicatos e aluminossilicatos remanescentes podem ser utilizados na indústria do cimento. Xu *et al.* (2019) avaliaram uma nova forma para a síntese de sais de titânio e polissilicato (PST) a partir de resíduos da indústria de titânio, oferecendo uma alternativa mais econômica e sustentável. Os PST sintetizados demonstraram excelente desempenho na floculação e sedimentação, sendo eficazes em uma ampla faixa de pH. Essa abordagem permite reduzir custos e solucionar o problema do tratamento de efluentes, promovendo a reutilização de resíduos valiosos.

## 4.5 HIDRODECLORAÇÃO

Antia (2022) demonstra a viabilidade de utilizar pastilhas de ZVI para dessalinizar água de forma eficiente e sustentável. O processo, que não exige energia externa e não gera salmoura, é ideal para

locais remotos. As pastilhas mostraram-se eficazes na remoção de sais de águas com salinidade entre 4 e 10 g/l, com potencial para diversas aplicações, como dessalinização de reservatórios e tratamento de águas residuais. A simplicidade do processo e a versatilidade das pastilhas abrem novas perspectivas para o tratamento de água em diversas áreas. Um novo adsorvente de baixo custo, produzido a partir de xisto betuminoso, para a remoção de cromo hexavalente (Cr (VI)) em águas contaminadas foi desenvolvido por Hamdan *et al.* (2023). O compósito de ZVI com base em carvão aluminossilicato ativado (ACS), com adição de caulino, demonstrou alta eficiência, especialmente em pH ácido. A remoção de Cr (VI) foi influenciada pelo pH, dosagem e temperatura. A utilização de xisto betuminoso como matéria-prima representa uma alternativa promissora para o tratamento de águas contaminadas. Oprckal *et al.* (2017) investigaram a eficácia de diferentes nanopartículas de ferro zero valente (nZVI) no tratamento de efluentes de pequenas ETAR. Os resultados demonstraram que as nZVI são capazes de remover metais, inativar patogênicos e reduzir compostos nitrogenados. A escolha do tipo de nZVI e a otimização das condições operacionais são cruciais para a eficácia da nanorremediação. Um novo catalisador de paládio-cobre, combinado com ZVI, para a remoção de nitrato em efluentes, atendendo aos rigorosos padrões chineses foi desenvolvido por Yun *et al.* (2018). O catalisador mostrou alta eficiência em testes com efluentes reais, com o mecanismo envolvendo a transferência de elétrons e formação de nitrogênio gasoso. Raman *et al.* (2021) desenvolveram partículas de ferro "verde" a partir de extrato de folhas de uva, demonstrando alta eficiência na remoção de corantes têxteis reativos. A descoloração de até 98% foi alcançada, com a redução dos corantes ocorrendo por adsorção e redução. A identificação de intermediários permitiu propor um mecanismo detalhado. O ferro "verde" surge como uma alternativa promissora e sustentável para o tratamento de efluentes têxteis.

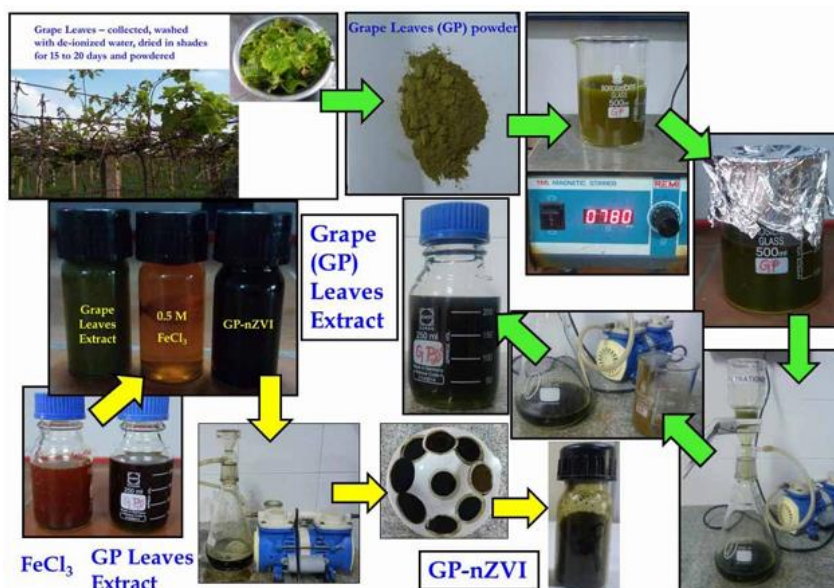


Figura 52 - Síntese das partículas de "ferro verde"  
 Fonte: Raman *et al.* (2021)

## 4.6 ANÁLISE ADICIONAL

Na Tabela 9 apresentam-se os 30 documentos dos temas adicionais do tratamento por cloração e por ultravioleta, conforme foram agrupados nos tópicos em que serão apresentados.

Tabela 9 - Documentos dos temas Cloração e Ultravioleta

| <b>Tópico</b>         | <b>Autores</b>   |
|-----------------------|--|
| Cloração              | Goodarzi <i>et al.</i> (2020); Huang <i>et al.</i> (2017); Miralles-Cuevas <i>et al.</i> (2021); Peng <i>et al.</i> (2021)   |
| Ultravioleta          | Albolafio <i>et al.</i> (2022); Brienza <i>et al.</i> (2020); Bogacki <i>et al.</i> (2017); Chhetri <i>et al.</i> (2018); Dlamini <i>et al.</i> (2019); Farzanehsa <i>et al.</i> (2023); Garcia-Costa & Casas (2022); GilPavas <i>et al.</i> (2019); Gomis <i>et al.</i> (2013); Gu <i>et al.</i> (2019); Kahoush <i>et al.</i> (2021); Linklater & Örmeci (2014); Maynez-Navarro <i>et al.</i> (2020); Meiramkulova <i>et al.</i> (2021); Olajire & Bamigbade (2021); Piras <i>et al.</i> (2022); Raashid <i>et al.</i> (2021); Rayaroth <i>et al.</i> (2022); Rodríguez-Chueca <i>et al.</i> (2019); Sciscenko <i>et al.</i> (2021); Slipko <i>et al.</i> (2022); Wolf <i>et al.</i> (2019); Wu <i>et al.</i> (2022); Zhang <i>et al.</i> (2017); Zhong <i>et al.</i> (2021) |
| Cloração/Ultravioleta | Zagklis & Bampos (2022)  |

Fonte: Elaboração própria

### 4.6.1 Cloração

Peng *et al.* (2021) observaram que o aumento do uso de cloro em ETAR durante a pandemia de COVID-19 intensificou a formação de subprodutos de desinfecção (DBP). O seu estudo investigou o impacto de processos biológicos comuns na formação desses compostos, concluindo que, apesar da redução de matéria orgânica, o tratamento biológico pode aumentar a formação de certos DBP, especialmente os bromados. A pesquisa destaca a importância de considerar a formação de DBP, ao otimizar os processos de tratamento. Goodarzi *et al.* (2020) demonstraram, por meio de um modelo numérico 3D, que a estabilidade do cloro residual em tanques de contato é significativamente afetada por temperatura e fluxo, concluindo que aumentos nesses parâmetros aceleram a degradação do cloro, influenciando a eficácia da desinfecção. A validação do modelo confirma a sua precisão, sublinhando a importância de considerar esses fatores no projeto e operação de sistemas de desinfecção. O impacto do cloreto na degradação do ácido ftálico, um DBP comum da degradação de corantes, num sistema de cobalto/peroximonossulfato é investigado por Huang *et al.* (2017). A presença de cloreto inibiu a degradação e a mineralização do ácido ftálico, reduzindo a formação de halogénios orgânicos adsorvíveis. Os resultados sugerem que o cloreto interfere nas reações de oxidação, alterando as vias de

degradação. Miralles-Cuevas *et al.* (2021) compararam diferentes POA, ativados por luz UV, para tratar efluentes secundários. A combinação de UV com persulfato e ferro mostrou-se mais eficaz para remover pesticidas, enquanto a cloração foi melhor para inativar bactérias. Os resultados indicam o potencial dos POA para o tratamento terciário.

### 4.6.2 Ultravioleta

Albolafio *et al.* (2022) avaliaram a formação de DBP em 15 ETAR, submetidas a diferentes processos de desinfecção. Os resultados indicam que o cloro e seus derivados aumentam significativamente a presença de DBP, enquanto o uso de PAA e UV elimina-os. O estudo destaca o risco do clorato e a importância de escolher tecnologias de desinfecção que minimizem a formação de DBP, especialmente para a reutilização da água. A formação de N-nitroso-CIP em ETAR com processos de nitrificação/desnitrificação e em experiências com lamas ativadas foi investigada por Brienza *et al.* (2020). Os resultados sugerem uma nova via de formação dessas substâncias, envolvendo a reação do óxido nítrico com aminas secundárias, durante o tratamento de lamas. Chhetri *et al.* (2018) propuseram um novo método de tratamento de águas residuais para regiões árticas como Kangerlussuaq, na Groenlândia. Devido às condições climáticas extremas e à dispersão populacional, os sistemas convencionais são desafiadores. A pesquisa demonstrou que a combinação de tratamento físico-químico, ultravioleta e PAA é uma alternativa eficaz para a remoção de contaminantes e a desinfecção da água, superando as limitações dos métodos tradicionais.

Linklater & Örmeci (2014) avaliaram a eficácia do ensaio de bioluminescência de trifosfato de adenosina (ATP) para monitorar a desinfecção, usando *escherichia-coli*, e amostras reais. O ATP mostrou-se sensível ao cloro, mas menos ao UV. Concluíram que o ensaio de ATP pode complementar métodos tradicionais, sendo útil para monitorizar a desinfecção com cloro. Um nanocompósito à base de quitosano, ferro e prata para o tratamento de águas residuais foi desenvolvido e caracterizado por Olajire & Bamigbade (2021). Os resultados demonstraram que o nanocompósito apresenta maior eficiência na remoção de contaminantes em comparação ao quitosano puro. A otimização das condições de tratamento permitiu identificar as melhores condições operacionais para a aplicação do nanocompósito, indicando o seu potencial como uma alternativa sustentável aos coagulantes convencionais. Slipko *et al.* (2022) investigaram durante 13 meses a eficácia de um sistema avançado de tratamento (ozonização + carvão ativado granular) na inativação de bactérias e genes resistentes a antibióticos em efluentes de uma ETAR. A dose de ozono foi otimizada e a *escherichia-coli*, resistente à ampicilina mostrou menor suscetibilidade à ozonização. Surpreendentemente, a abundância do gene *blaTEM-1* aumentou após o tratamento com carvão ativado.

Farzanehsa *et al.* (2023) compararam a eficácia dos POA UV/peróxido de hidrogénio e UV/cloro no tratamento de águas contaminadas. Os autores concluíram que, apesar do uso tradicional do UV/peróxido de hidrogénio, o UV/cloro emerge como uma alternativa promissora devido à sua eficiência e potencial económico. No entanto, são necessárias mais pesquisas para avaliar a formação de subprodutos e a aplicabilidade em larga escala. Foi revisto por Garcia-Costa & Casas (2022) os POA baseados em peróxido de hidrogénio, como *Fenton* e oxidação húmida catalítica com peróxido (CWPO). Apesar da eficiência, esses processos apresentam limitações. A intensificação térmica desses processos tem sido explorada para ultrapassar essas limitações, mas ainda há desafios a serem superados. Piras *et al.* (2022) combinaram um POA por UV no vácuo com biofiltração para tratar águas residuais, comparando carbono ativado e zeólita. A combinação aumentou significativamente a remoção de contaminantes emergentes e a biodegradabilidade do efluente, com o pré-tratamento por UV no vácuo sendo particularmente eficaz.

Rayaroth *et al.* (2022) alertam para a formação de nitrocompostos durante o tratamento de águas residuais por POA. Na presença de nitratos e nitritos, as reações de oxidação geram espécies reativas de nitrogénio que podem reagir com poluentes, formando nitrocompostos ainda mais tóxicos. O estudo compara diferentes POA, analisando os mecanismos de formação desses compostos e os seus impactos ambientais. Foi aplicado por Rodríguez-Chueca *et al.* (2019) diferentes POA numa ETAR para remover antibióticos e genes de resistência. A combinação de peróxido de hidrogénio ou peroximonossulfato com UV-Cloro mostrou-se mais eficaz na remoção de antibióticos, enquanto a UV-Cloro isolada foi mais eficiente para os genes de resistência. Os resultados indicam a necessidade de otimizar os tratamentos para remover ambos os contaminantes. Wu *et al.* (2022) constataram que a pandemia da COVID-19 aumentou o consumo de antivirais, como a ribavirina, exigindo novas soluções para o tratamento de águas residuais. Nas suas experiências, o processo UV/dióxido de titânio/peróxido de hidrogénio mostrou-se eficaz na remoção rápida da ribavirina, não se atingindo a mineralização completa. Esse estudo ressalta a importância de analisar não apenas a remoção, mas também a formação de subprodutos durante o tratamento de efluentes.

Zhang *et al.* (2017) notam que o PAA é um oxidante eficaz para o tratamento de águas residuais, incluindo a remoção de  $\beta$ -lactâmicos, antibióticos amplamente utilizados. Neste estudo, investigam a cinética da reação entre o PAA e sete  $\beta$ -lactâmicos comuns. Os resultados indicam que a oxidação pelo PAA é uma estratégia promissora para a eliminação desses antibióticos, em águas residuais. Gomis *et al.* (2013) avaliam SBO extraídas de resíduos urbanos como fotossensibilizadores para a degradação fotocatalítica do corante violeta cristal. Os resultados indicam que as SBO promovem a fotodescoloração deste corante através da formação de um complexo entre o corante e o sensibilizador. Além disso, as SBO foram capazes de melhorar a eficiência do processo foto-*Fenton* em pH neutro, sugerindo um mecanismo de reação diferente do convencional.

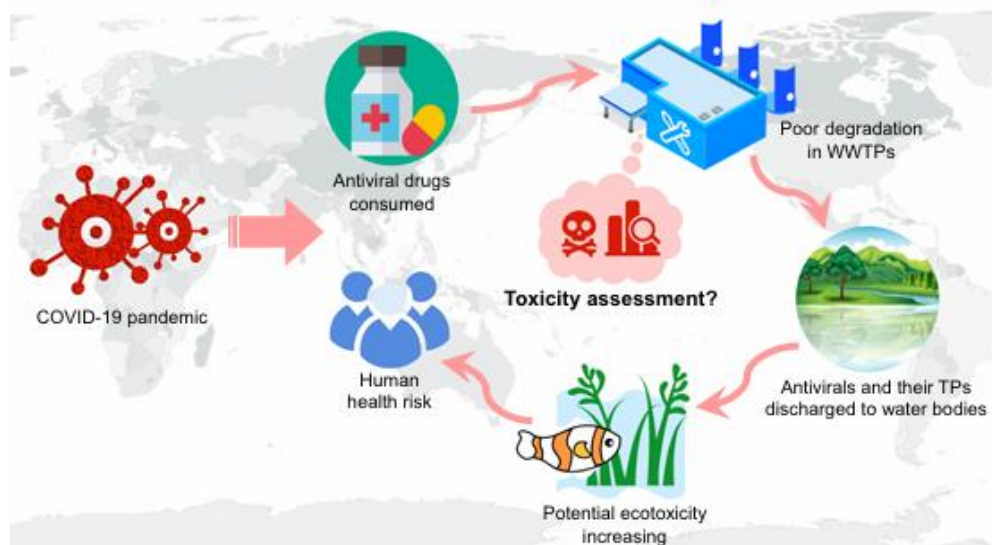


Figura 53 - Provável ecotoxicidade causada pelo Covid-19  
 Fonte: Wu *et al.* (2022)

Kahoush *et al.* (2021) desenvolveram um biocatalisador de glicose oxidase, imobilizada em feltro de carbono tratado por plasma, utilizando genipina como reticulante. O material mostrou alta atividade e estabilidade em processos bio-*Fenton* e bio-eleto-*Fenton* para tratamento de efluentes têxteis, removendo eficientemente cor e carga orgânica. A genipina mostrou-se um reticulante eficaz para a imobilização da enzima, abrindo novas perspectivas para processos biocatalíticos sustentáveis. O alto potencial de um nanocompósito magnético de óxido de zinco e ferro para a remoção de poluentes e a desinfecção de água em POA é demonstrado por Maynez-Navarro *et al.* (2020). O material sintetizado mostrou alta eficiência na degradação de corantes e inativação de bactérias, além de permitir uma fácil recuperação e reutilização.

Sciscenko *et al.* (2021) avaliaram um novo fotocatalisador magnético numa ETAR piloto. O material, composto por dióxido de titânio, dióxido de ferro e dióxido de silício, demonstrou alta eficiência na degradação de antibióticos e desinfecção da água, especialmente em condições neutras. A sua fácil separação magnética e reutilização revela-se promissora para o tratamento de água. Raashid *et al.* (2021) propuseram uma nova abordagem para tratar a água contaminada por pesticidas, como o Confidor®. Diante da escassez hídrica e da persistência de poluentes, os autores combinaram ozonização e fotocatalise com dois catalisadores diferentes para acelerar a degradação do Confidor®. Os resultados indicam que essa combinação é mais eficaz do que o uso de um único catalisador, demonstrando a importância de explorar novas tecnologias para o tratamento da água.

GilPavas *et al.* (2019) avaliaram a eficácia de um POA baseado em ZVI e peróxido de hidrogénio para tratar efluentes têxteis complexos. O processo demonstrou alta eficiência na remoção de cor, carga orgânica e toxicidade, melhorando a biodegradabilidade do efluente. No entanto, a presença de ácidos carboxílicos de baixo peso molecular indica a necessidade de tratamentos complementares. Gu *et al.*

(2019) revelam que a aplicação de um campo magnético alternado em sulfato férrico polimérico antes da coagulação de efluentes têxteis mostrou-se eficaz em reduzir a poluição por ferro e melhorar a remoção de matéria orgânica e turbidez. A combinação do sulfato férrico polimérico com a magnetização otimizou o processo de tratamento, tornando-o mais eficiente e ambientalmente amigável.

Bogacki *et al.* (2017) avaliaram a eficácia da flotação por ar dissolvido assistida por coagulação com diferentes sais de alumínio no tratamento de efluentes de uma indústria de cosméticos. Os resultados mostraram que a remoção de carga orgânica variou entre as amostras, sendo mais eficiente para loções e champô. A amostra de cremes com filtro UV apresentou maior resistência ao tratamento. A eficácia do eletrólise como pré-tratamento num sistema integrado para tratar efluentes de matadouros de aves é estudada por Meiramkulova *et al.* (2021). Os resultados indicam que o eletrólise contribuiu significativamente para a remoção de diversos contaminantes, especialmente cloro total, nitrato e carência bioquímica de oxigênio. Essa tecnologia demonstra ser uma ferramenta promissora para o tratamento eficiente de águas residuais desse setor. Wolf *et al.* (2019) propuseram uma nova forma de monitorar a eficácia da ozonização na inativação de vírus em água. Os autores utilizaram a redução da absorção UV e a degradação da carbamazepina, um micropoluente, como indicadores indiretos da inativação viral. Os resultados mostraram que esses parâmetros podem ser utilizados para estimar a eficácia do tratamento em água superficial e efluentes. A aplicação em escala piloto confirmou a viabilidade dessa abordagem. A preocupação com a presença de antibióticos e genes de resistência em efluentes é destacada por Zhong *et al.* (2021). Nesse estudo demonstram a eficácia da reação UV-*Fenton* catalisada por resina magnética de troca aniônica na degradação de antibióticos e redução de genes de resistência, apresentando-se como uma tecnologia promissora para o tratamento de águas residuais. Dlamini *et al.* (2019) investigam nanopartículas de cobre, sintetizadas utilizando um biofloculante, que demonstraram alta eficiência na remoção de poluentes e microrganismos em águas residuais. A baixa concentração necessária para a floculação e a ampla faixa de atuação de pH tornam essa tecnologia promissora para a remoção de corantes das águas residuais.

#### 4.6.3 Cloração/Ultravioleta

Zagklis & Bampos (2022) compararam a eficiência de diferentes métodos de tratamento terciário de efluentes, após o tratamento convencional por lamas ativadas. O estudo destaca o processo foto-*Fenton* pela alta eficiência na remoção de contaminantes e a cloração/UV pelos menores custos. Os autores propõem uma ferramenta de decisão para auxiliar na escolha do método mais adequado.

## 4.7 COMPÊNDIO DA REVISÃO DA LITERATURA

De seguida apresenta-se uma tabela sintetizando as ideias principais dos tópicos e subtópicos da visão geral da literatura.

Tabela 10 - Tabela Síntese (Parte 1)

| <b>Tópico</b>            | <b>Subtópicos</b>                     |   |
|--------------------------|---------------------------------------|---|
| Absorção                 | Nanotecnologia                        | Nanotubos de carbono                        |
|                          |                                       | Nanocompósitos de argila                    |
|                          |                                       | Óxidos metálico                             |
|                          | Biofloculantes naturais               | Resíduos de biomassa                        |
|                          |                                       | Cascas de fruta                             |
|                          |                                       | Madeiras e outros materiais agrícolas       |
|                          | Biofloculantes minerais               | Zeólitas                                    |
|                          |                                       | Bentonitas                                  |
|                          |                                       | Argilas                                     |
|                          | Materiais à base de grafeno e carbono |   |
| Reutilização de resíduos | Biossólidos                           |   |
|                          | Lamas de ETAR                         |   |
|                          | Pós de tijolo                         |   |
| Eletrocoagulação         | Remoção de contaminantes              | Corantes                                    |
|                          |                                       | Matéria orgânica                            |
|                          |                                       | Turbidez                                    |
|                          |                                       | Fósforo                                     |
|                          |                                       | Micro-plásticos                             |
|                          | Tratamento de efluentes               | Têxtil                                      |
|                          |                                       | Alimentar                                   |
|                          |                                       | Hospitalar                                  |
|                          | Combinação com outras técnicas        | Processos de oxidação avançada              |
|                          |                                       | Biodegradação por fungos                    |
|                          |                                       | Biomassa granular de cinzas volantes        |
|                          |                                       | Cavitação hidrodinâmica                     |
|                          | Reutilização de resíduos              | Biodiesel a partir de óleo de cozinha usado |

A absorção de contaminantes em águas residuais revela que o carbono ativado, tradicionalmente utilizado é eficaz, mas dispendioso, havendo necessidade de encontrar alternativas mais económicas e eficientes para a remoção de poluentes, especialmente os metais pesados. Em estudo está a utilização da nanotecnologia, com materiais como nanotubos de carbono, nanocompósitos de argila, e óxidos metálicos, que apresentam grande potencial adsorvente. Os biofloculantes naturais tais como diversos resíduos de biomassa, cascas de frutas, madeira e outros materiais agrícolas, têm sido investigados como

adsorventes, tanto isoladamente quanto em combinação com outros compostos. Além dos biofloculantes minerais tais como zeólitas, bentonitas, argilas e outros materiais inorgânicos, também demonstram boa capacidade de adsorção e dos materiais à base de grafeno e carbono, que apresentam alta eficiência na remoção de contaminantes. Na reutilização de resíduos, os estudos exploram a transformação de biossólidos, lamas de ETAR, pós de tijolo, e outros resíduos industriais em adsorventes.

A eletrocoagulação mostra-se uma técnica promissora para tratar diversos tipos de águas residuais, removendo uma ampla gama de contaminantes como corantes, matéria orgânica, turbidez, fósforo e até mesmo microplásticos, sendo eficiente em diversos tipos de efluentes industriais tais como têxtil, alimentar e hospitalar. Combinada com outras técnicas, tais como os processos de oxidação avançada, biodegradação por fungos, biomassa granular de cinzas volantes ou cavitação hidrodinâmica, aumenta significativamente a eficiência na remoção de contaminantes mais complexos e resistentes, sendo que, a otimização dos parâmetros operacionais é fundamental para maximizar a eficiência da eletrocoagulação. Esta também pode ser aplicada no tratamento de águas residuais geradas em processos de reutilização de resíduos, como o tratamento de efluentes de produção de biodiesel a partir de óleo de cozinha usado.

Tabela 11 - Tabela Síntese (Parte 2)

| Tópico          | Subtópicos                   |                                      |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Floculação      | Coagulantes naturais         | Sementes de Moringa                  |
|                 |                              | Quitosano                            |
|                 |                              | Taninos                              |
|                 |                              | Extratos de plantas                  |
|                 | Biofloculantes               | Polímeros extracelulares microbianos |
|                 |                              | Bactérias                            |
|                 |                              | Leveduras                            |
|                 |                              | Plantas                              |
|                 |                              | Goma de <i>Guar</i>                  |
|                 |                              | Fécula de mandioca                   |
|                 | Reutilização de resíduos     | Lama vermelha                        |
|                 |                              | Cinzas volantes                      |
|                 |                              | Sais de titânio                      |
| Hidrodecloração | Pastilhas de ZVI             |                                      |
|                 | Nanopartículas de ZVI        |                                      |
|                 | Catalizador combinado com ZV |                                      |
|                 | Ferro “verde”                |                                      |
| Cloração        | Formação de DBP              |                                      |
|                 | Inativação de bactérias      |                                      |
| Ultravioleta    | Elimina DBP                  |                                      |
|                 | UV/Cloro                     |                                      |

A utilização de coagulantes tradicionais à base de alumínio gera preocupações ambientais devido à produção de resíduos e lamas não biodegradáveis. A procura por alternativas mais sustentáveis e eficientes para o tratamento de águas residuais é constante. Os coagulantes naturais, tais como sementes de *Moringa*, quitosano, taninos, extratos de plantas e outros materiais naturais, têm demonstrado grande potencial como coagulantes. Os biofloculantes tais como polímeros extracelulares microbianos, biofloculantes produzidos por bactérias, leveduras e plantas, além de produtos de origem vegetal como a goma de *Guar* e a fécula de mandioca são alternativas promissoras. Materiais como lama vermelha, cinzas volantes e sais de titânio têm sido investigados como coagulantes, promovendo a valorização de resíduos industriais.

A hidrodecloração versa sobre a viabilidade de utilização de pastilhas de ferro zero valente, ZVI, para a dessalinização da água, nanopartículas de ZVI para tratamento de efluentes de uma pequena ETAR, um novo catalisador combinado com ZVI para remoção de nitrato e partículas de ferro “verde” produzidas a partir de extrato de folhas de uva para a remoção de corantes têxteis reativos.

No tópico da cloração verificou-se que o aumento da utilização de cloro, durante a pandemia COVID-19 intensificou a formação de subprodutos de desinfecção (DBP) e que a cloração foi mais eficaz para a inativação de bactérias, quando comparada com a combinação de UV com persulfato e ferro, onde se constatou maior eficácia na remoção de pesticidas.

No tratamento por UV verifica-se que o cloro e seus derivados aumentam a presença de DBP, enquanto o uso de ácido peracético e UV os elimina, sendo essencial escolher as tecnologias de desinfecção que minimizem a formação de DBP, principalmente quando se almeja reutilizar a água.

Os processos de oxidação avançada com utilização de UV/peróxido de hidrogénio são mais comuns, no entanto, surge a combinação UV/cloro mais eficiente e económica, necessitando de mais estudos sobre a formação de DBP. A combinação de peróxido de hidrogénio com UV/cloro é mais eficaz para remover antibióticos, enquanto UV/Cloro isolada é mais eficaz na remoção de genes de resistência.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

## 5.1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho, elaborado com o intuito de conhecer o estado atual sobre o tratamento de águas residuais, viabiliza a conclusão do 2.º ciclo de estudos e teve como objetivo principal a realização de uma análise que permitisse discernir o estado atual da pesquisa desenvolvida, a nível mundial, na temática do tratamento das águas residuais, objetivo que se considera superado.

Para melhor entender o presente e preparar o futuro, realizou-se um enquadramento histórico do tratamento e drenagem de águas residuais, explanado no primeiro capítulo.

No capítulo 2 apresentou-se detalhadamente a metodologia a adotar no desenrolar do trabalho. A análise bibliométrica, efetuada com informação extraída da *Web of Science*, no início de junho de 2024, foi descrita em pormenor no 3.º capítulo. No capítulo 4 está presente a revisão da literatura, na forma de uma visão geral da amostra selecionada.

## 5.2 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Para atingir o objetivo principal, definiram-se 3 objetivos específicos, que serão comentados de seguida.

1. Analisar o período entre 1950 e 2024, o que renderá uma amostra de milhares de resultados, com seleção da amostra a realizar em data a definir.

Ao analisar o período definido e após exclusão do material não relevante, a amostra revelou 90 178 documentos. Conforme os parâmetros definidos em 2.1.4 para a seleção da amostra, este valor reduzia-se a 272 documentos. No entanto, considerou-se que este número poderia não ser suficiente para bem entender o estado atual do tratamento de águas residuais. Assim, estendeu-se a análise à amostra inicial de 90 178 documentos, nas variáveis do ponto seguinte.

2. Analisar as variáveis seguintes, sob a amostra de 90 178 documentos:

2.1 Evolução (Indicador quantitativo) – Comprova-se o crescente aumento do interesse da comunidade académica ao longo do tempo, uma vez que até 2003 publicaram-se 8,6% dos documentos, registando-se os restantes 91,4% após este ano.

2.2 Tipos de publicação (Indicador quantitativo) – Constata-se 80% de publicações do tipo artigos, 11% artigos de conferência e 8% artigos de revisão, o que reflete o interesse para a análise, uma vez que estes documentos denotam maior rigor técnico, por serem sujeitos à revisão por pares.

2.3 Áreas de estudo (Indicador quantitativo) – Verificou-se que o tema em análise, apesar de abranger várias áreas de estudo, recai principalmente sobre as áreas das ciências e ambiente.

2.4 Principais países (Indicador quantitativo) – 29% das publicações são oriundas da China, seguido de 12,3% dos Estados Unidos da América e da Índia com 6,4%. Apesar de serem identificados

29 idiomas, 98,6% das publicações são em inglês. Portugal tem vindo a aumentar gradualmente a sua representação, detendo o máximo 157 documentos, em 2021.

2.5 Principais instituições (Indicador quantitativo) – A instituição com mais publicações é a *Chinese Academy of Sciences*, da China, seguida *Egyptian Knowledge Bank EKB*, do Egipto e da *Harbin Institute of Technology*, também da China. Registam-se instituições com mais de 500 publicações distribuídas pelos 5 continentes. A Universidade da Madeira está presente em 9 publicações, entre 2020 e 2024.

2.6 Principais publicações (Indicador qualitativo) – A revista mais escolhida para publicar foi a *Water Science and Technology*, com 4 398 artigos. No entanto, esta revista é seguida pela *Water Research* que publicou 3 355 documentos apresenta um JCI de 2.15, estando colocada no Q1 do JCI nas várias categorias das ciências em que se inclui e com percentis, também do JCI, acima dos 97, destacando-se assim das demais.

2.7 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Indicador quantitativo) – 65,6% dos documentos são referenciados ao objetivo 06 Água Potável e Saneamento, sendo incontestável o interesse da comunidade académica na investigação sobre o tema do tratamento de águas residuais e a necessidade de intervenção urgente para melhorar e providir as populações de sistemas adequados de distribuição de água e de saneamento de águas residuais.

3. Análise adicional: diferenças nas pesquisas científicas sobre tratamentos para água destinada à reutilização, designadamente ultravioleta (UV) e cloração.

Apesar de em número reduzido, registam-se publicações sobre a cloração antes do tratamento por UV. No entanto, a partir de 1996, quando a cloração é referenciada em 5 documentos e o UV em 17, os números começam a afastar-se, sendo que em 2010 os documentos sobre UV ultrapassam a centena, mantendo a tendência até ao ano de 2023. Da amostra de 90 178 documentos sobre o tema do tratamento de águas residuais, 737 são sobre o tema cloração e 5 724 são sobre o tratamento por UV, correspondendo a 0,82% e 6,35% respetivamente da amostra inicial.

Relativamente aos países com mais publicações, a China e os Estados Unidos são cimeiros na cloração e a China e a Índia no tratamento por UV.

Para complementar a análise efetuou-se uma análise das palavras-chave, colaboração internacional, citações e autores da amostra de 272 documentos que seria alvo da revisão de literatura. Diz-se seria, porque dado este trabalho decorrer num hiato temporal algo considerável, quando se efetuou esta análise, este era o número expectável. No entanto, poucos meses depois, quando a atenção recaí sobre a revisão da literatura, alguns destes documentos não estavam acessíveis ou tinham sido retirados pelo autor e/ou editora, reduzindo-se a 256 artigos.

Assim, nos 272 documentos analisados as palavras-chave com mais registos e com maior co-ocorrência são remoção, tratamento de águas residuais e adsorção. O artigo mais citado, de Crini &

Lichtfouse foi publicado em 2019, tendo recebido 1 116 citações, sendo também o que tem a maior média de citações por ano, 186 citações. O número de citações para os 272 artigos veio a aumentar, tendo atingido a centena em 2016 e o milhar em 2020, sendo que em 2023 ocorreram 3 417 citações para 256 artigos. Não se verificou a colaboração internacional de países nem de autores.

Relativamente aos 24 documentos da amostra de 737 sobre o tema cloração, a palavra-chave com mais ocorrências, como esperado, foi cloração. Dos 178 documentos da amostra de 5 724 sobre o tema do tratamento por UV, as palavras-chaves mais utilizadas foram tratamento de águas residuais, remoção, degradação e POA. Em nenhuma das amostras se verificou evidências de colaboração internacional.

### 5.3 VISÃO GERAL DA LITERATURA

Conforme referido, a revisão da literatura, na forma de visão geral, incidiu sobre 256 documentos que foram distribuídos em 27 subtópicos dos 6 tópicos, designadamente Absorção, Eletrocoagulação, Floculação, Hidrodecloração, Cloração e UV.

A absorção no tratamento de águas residuais, faz-se usualmente com recurso a carbono ativado, que sendo um adsorvente caro impulsiona a necessidade de identificação de alternativas mais económicas, para a remoção de contaminantes como metais pesados dos efluentes das águas residuais. A nanotecnologia, tal como nanotubos de carbono, nanocompósitos de argila, betonite, dióxido de magnésio e óxido de ferro, tem demonstrado potencial para atuar como adsorventes. A investigação tem recaído sobre os biofloculantes naturais tais como os resíduos de biomassa, carvão ativado a partir de cascas de tangerina, biocarvão de folhas de *Eriobotrya japonica* (nespereira), madeira e seus resíduos, borra de café, casa de *Pinus elliottii*, cascas de pinhão, bambu, casca de romã, pó da casca de banana, casca de uva, caroços de azeitona, casca de laranja, polpa do bagaço da cana-de-açúcar, resíduos dos cachos de palma, casca de ovo, lignocelulose de folhas caídas, casca de noz, quitosano e quitosano/gelatina, lignina, resina fenólica, biomassa de intervenções paisagísticas, resíduos agrícolas, como pedras e ervas, cascas de cacau, cascas de manga, casca de cebola, farelo de milho e de trigo, cinzas de cascas de arroz, pétalas de rosa, alga *Ascophyllum nodosum*, têm sido estudados para aplicação, sozinhos ou em conjunto com outros compostos, na absorção de contaminantes. Os biofloculantes minerais como a zeólita faujasita, sílica zeólita mordenita, bentonita, zeólita natural, resíduos de lamas de alúmen, organo-zeólitas, montmorilonita organofílica, pedra-pomes, argilas e geopolímeros à base de argila, gel de sílica com nanocompósitos de polianilina e ferritas magnéticas têm apresentado boas capacidades de absorção. Os materiais à base de grafeno e carbono também se destacam pela eficiência na remoção de contaminantes. Quanto à reutilização de resíduos, estudou-se a transformação de biosólidos e lamas de ETAR para utilização como adsorventes, pós de tijolo e ceramsita para a remoção de fósforo e escória de alto forno para a remoção de corantes de efluentes.

A eletrocoagulação tem se destacado como uma técnica promissora para a remoção de cor, carência química e bioquímica de oxigênio, turbidez, fósforo, microrganismos, microplásticos de poliéster de águas residuais complexas. Salienta-se a necessidade otimizar os parâmetros operacionais e porventura a sua combinação com outras tecnologias para aumento da sua eficiência. Os processos combinados identificados foram oxidação de *Fenton* e biodegradação por fungos, biomassa granular de cinzas volantes com o processo de *Fenton*, eletrocoagulação e eletroxidação, coagulação química e eletro-*Fenton*, cavitação hidrodinâmica e processo *Fenton* heterogêneo e processos *Fenton* e degradação aeróbica. Os processos de oxidação avançada podem ser do tipo *Fenton*, fotocatalise, ozonização e processos eletroquímicos, os quais são eficientes no tratamento de águas residuais com contaminantes resistentes. No entanto, a sua eficácia depende do tipo de processo, tipo de poluentes e condições de operação. O tratamento de efluentes das indústrias requer especial atenção. A indústria têxtil necessita de um tratamento mais aprimorado para degradação de corantes e evitar a formação de novos poluentes. Têm sido desenvolvidos processos como diferentes combinações de elétrodos no tratamento de efluentes de um matadouro de aves, processo de *Fenton* com ferro zero valente e peróxido de hidrogênio no tratamento de águas residuais de oficinas mecânicas, lamas ativadas para tratamento de efluentes de uma indústria de conservas de peixe, oxidação eletroquímica com elétrodo de diamante impregnado com boro no tratamento de efluentes de curtumes, fotodegradação para a remoção da azitromicina, ozonização da ciprofloxacina em efluentes hospitalares, entre outros. Na reutilização de resíduos, identificou-se a utilização do "brown grease" para a produção de biodiesel e a eficácia da eletrocoagulação no tratamento de águas residuais de biodiesel produzido a partir de óleo de cozinha usado.

No âmbito da floculação, a comunidade acadêmica tem investigado os coagulantes naturais como sementes de *Moringa stenopetala* e *Moringa oleífera*, quitosano carbonizado e ácido de *Moringa oleífera*, extratos de sementes de *Leucaena leucocephala*, taninos de Acácia modificados, extrato de lentilha vermelha, extratos de lentilha, combinados com DMC e argilas locais, que se têm revelado eficientes no processo. Os coagulantes orgânicos têm superado os coagulantes inorgânicos como o PAC, sendo que novos coagulantes inorgânicos surgem como alternativa aos convencionais para a remoção de carga orgânica e metais pesados de efluentes. Os biofloculantes são uma alternativa sustentável aos coagulantes tradicionais, produzindo menos resíduos e lamas biodegradáveis. Estes biofloculantes são do tipo polímeros extracelulares microbianos, biofloculantes produzidos a partir de actinobactérias, da bactéria *Bacillus sp. ISTVK1*, da levedura *Pichia kudriavzevii*, da goma de *Guar*, de origem vegetal, da planta *Tacca leontopetaloides* ou floculantes naturais como a fécula de mandioca, sementes de *Plantago ovata* e *Moringa oleífera*. No tratamento de efluentes das indústrias, os biofloculantes são influenciados pelo pH, temperatura e natureza dos corantes, tendo-se estudado também a eficiência de diferentes coagulantes na remoção de carência química de oxigênio em efluentes da indústria do papel. A

reutilização de resíduos incidu sobre a lama vermelha, cinzas volantes e sais de titânio e polissilicato, que permitiu a reutilização de resíduos valiosos.

A hidrodecloração versa sobre a viabilidade de utilização de pastilhas de ZVI para a dessalinização da água, um composto de ZVI para a remoção de crómio hexavalente, nanopartículas de ZVI para tratamento de efluentes de uma pequena ETAR, um novo catalisador combinado com ZVI para remoção de nitrato e partículas de ferro “verde” produzidas a partir de extrato de folhas de uva para a remoção de corantes têxteis reativos.

No tópico da cloração verificou-se que o aumento da utilização de cloro, durante a pandemia do COVID-19 intensificou a formação de subprodutos de desinfecção (DBP). Investigou-se o impacto do cloreto na degradação de um desses subprodutos e verificou-se que a cloração foi mais eficaz para a inativação de bactérias.

No tratamento por UV verifica-se que o cloro e seus derivados aumentam a presença de DBP enquanto o uso de ácido peracético e UV os elimina, sendo essencial escolher as tecnologias de desinfecção que minimizem a formação de DBP, principalmente quando se almeja reutilizar a água. A combinação UV/cloro é mais eficiente e económica do que a combinação mais comum de UV/peróxido de hidrogénio, necessitando de mais estudos sobre a formação de DBP.

### 5.4 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como limitação do presente trabalho identifica-se a utilização de várias amostras. A utilização da amostra inicial para a análise bibliométrica teve o intuito de apresentar uma visão mais abrangente, em vez da amostra reduzida da visão geral da literatura que iria limitar o estudo a apenas duas centenas e meia de documentos. Outra limitação foi a utilização de apenas uma base de dados, a *Web of Science*, uma vez que a comparação com os resultados de outra base de dados como a *Scopus*, permitiria, possivelmente, enriquecer o conhecimento sobre o tema em estudo.

Como desenvolvimentos futuros identificam-se:

- I. Desenvolvimento do estudo de cada tópico da visão geral da literatura, através da sua descrição detalhada, tabelas comparativas de materiais, vantagens, desvantagens e sinergias;
- II. Análise dos métodos de tratamento mais adequados a cada tipo de contaminante, principalmente para os efluentes industriais;
- III. Estudo do impacto socioeconómico através dos benefícios para a saúde pública, promoção da economia circular e desafios para a implementação destas tecnologias em escala real;
- IV. Análise do ciclo de vida dos materiais, considerando os seus impactos ambientais, desde a produção até à deposição final.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## Referências Bibliográficas

- Abiyu, A., Yan, D., Girma, A., Song, X., & Wang, H. (2018). Wastewater treatment potential of *Moringa stenopetala* over *Moringa olifera* as a natural coagulant, antimicrobial agent and heavy metal removals. *Cogent Environmental Science*, 4, Article 1433507. <https://doi.org/10.1080/23311843.2018.1433507>
- Agunbiade, M., Pohl, C., & Ashafa, A. (2016). A Review of the Application of Bioflocualnts in Wastewater Treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25, 1381-1389. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61063>
- Ahmed, S., Al Khateeb, R., & Shreeshivadasan, C. (2018). Treatment of textile wastewater using a novel electrocoagulation reactor design. *Global Nest Journal*, 20, 449-457. <https://doi.org/10.30955/gnj.002519>
- Ajao, V., Bruning, H., Rijnaarts, H., & Temmink, H. (2018). Natural flocculants from fresh and saline wastewater: Comparative properties and flocculation performances. *Chemical Engineering Journal*, 349, 622-632. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.123>
- Ajmi, K., Vismara, E., Manai, I., Haddad, M., Hamdi, M., & Bouallagui, H. (2018). Polyvinyl acetate processing wastewater treatment using combined Fenton's reagent and fungal consortium: Application of central composite design for conditions optimization. *Journal of Hazardous Materials*, 358, 243-255. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.050>
- Albolafio, S., Marín, A., Allende, A., García, F., Simón-Andreu, P., Soler, M., & Gil, M. (2022). Strategies for mitigating chlorinated disinfection byproducts in wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 288, Article 132583. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132583>
- Ali, I., Basheer, A. A., Mbianda, X. Y., Burakov, A., Galunin, E., Burakova, I., Mkrtchyan, E., Tkachev, A., Grachev, V. (2019). Graphene based adsorbents for remediation of noxious pollutants from wastewater. *Environment International*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.029>
- Ali, M., Hoque, M., Hossain, S., & Biswas, M. (2020). Nanoadsorbents for wastewater treatment: next generation biotechnological solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 4095-4132. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02755-4>
- Alias, J., Abu Hasan, H., Abdullah, S., & Othman, A. (2022). Properties of bioflocculant-producing bacteria for high flocculating activity efficiency. *Environmental Technology & Innovation*, 27, Article 102529. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102529>
- Alsawy, T., Rashad, E., El-Qelish, M., & Mohammed, R. (2022). A comprehensive review on the chemical regeneration of biochar adsorbent for sustainable wastewater treatment. *Npj Clean Water*, 5, Article 29. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00172-3>
- Alves, T., Mota, J., & Pinheiro, A. (2020). Biosorption of organic micropollutants onto lignocellulosic-based material. *Water Science and Technology*, 82, 427-439. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.333>
- Antia, D. (2022). Purification of Saline Water Using Desalination Pellets. *Water*, 14, Article 2639. <https://doi.org/10.3390/w14172639>
- Aquae Urbis Romae: the Waters of the City of Rome, <https://waters.iath.virginia.edu/first.html>

- Aragaw, T., & Bogale, F. (2023). Role of coagulation/flocculation as a pretreatment option to reduce colloidal/bio-colloidal fouling in tertiary filtration of textile wastewater: A review and future outlooks. *Frontiers in Environmental Science*, *11*, Article 1142227. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1142227>
- Araújo, C. A. (2006). Bibliometria: Evolução Histórica e Questões Atuais. *Em Questão*, *12* (1), 11–32. <https://seer.ufrgs.br/EmQuestao/article/view/16>
- Artifon, W., Cesca, K., de Andrade, C., de Souza, A., & de Oliveira, D. (2021). Dyestuffs from textile industry wastewaters: Trends and gaps in the use of bioflocculants. *Process Biochemistry*, *111*, 181-190. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.10.030>
- Asfaha, Y., Tekile, A., & Zewge, F. (2021). Hybrid process of electrocoagulation and electrooxidation system for wastewater treatment: A review. *Cleaner Engineering And Technology*, *4*, Article 100261. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100261>
- Aslam, M., Kuo, H., Den, W., Usman, M., Sultan, M., & Ashraf, H. (2021). Functionalized Carbon Nanotubes (CNTs) for Water and Wastewater Treatment: Preparation to Application. *Sustainability*, *13*, Article 5717. <https://doi.org/10.3390/su13105717>
- Ayalew, A. (2022). A critical review on clay-based nanocomposite particles for application of wastewater treatment. *Water Science And Technology*, *85*, 3002-3022. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.150>
- Bashir, M., Wong, L., St Hilaire, D., Kim, J., Salako, O., Jean, M., & Pratt, L. (2020). Biodiesel fuel production from brown grease produced by wastewater treatment plant: Optimization of acid catalyzed reaction conditions]. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, *8*, Article 103848. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103848>
- Bazrafshan, E., Zakeri, H., Vieira, M., Derakhshan, Z., Mohammadi, L., Mohammadpour, A., & Khaneghah, A. (2022). Slaughterhouse Wastewater Treatment by Integrated Chemical Coagulation and Electro-Fenton Processes. *Sustainability*, *14*, Article 11407. <https://doi.org/10.3390/su141811407>
- ben Mosbah, M., Mechi, L., Khiari, R., & Moussaoui, Y. (2020). Current State of Porous Carbon for Wastewater Treatment. *Processes*, *8*, Article 1651. <https://doi.org/10.3390/pr8121651>
- Ben-Ali, S. (2021). Application of Raw and Modified Pomegranate Peel for Wastewater Treatment: A Literature Overview and Analysis. *International Journal of Chemical Engineering*, *2021*, Article 8840907. <https://doi.org/10.1155/2021/8840907>
- Bermúdez, L., Pascual, J., Martínez, M., & Capilla, J. (2021). Effectiveness of Advanced Oxidation Processes in Wastewater Treatment: State of the Art. *Water*, *13*, Article 2094. <https://doi.org/10.3390/w13152094>
- Bhagawan, D., Chandan, V., Srilatha, K., Shankaraiah, G., Rani, M., & Himabindu, V. (2018, 2018-01-01). *Industrial wastewater treatment using electrochemical process*. 4th International Conference on Water Resource And Environment (WRE 2018), Kaohsiung City, Taiwan. <https://doi:10.1088/1755-1315/191/1/012022>
- Bhat, S., Sher, F., Hameed, M., Bashir, O., Kumar, R., Vo, D., & Lima, E. (2022). Sustainable nanotechnology based wastewater treatment strategies: achievements, challenges and future

- perspectives. *Chemosphere*, 288, Article 132606. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132606>
- Bidu, J., van der Bruggen, B., Rwiza, M., & Njau, K. (2021). Current status of textile wastewater management practices and effluent characteristics in Tanzania. *Water Science And Technology*, 83, 2363-2376. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.133>
- Bilinska, L., & Gmurek, M. (2021). Novel trends in AOPs for textile wastewater treatment. Enhanced dye by-products removal by catalytic and synergistic actions. *Water Resources and Industry*, 26, Article 100160. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100160>
- Bogacki, J., & Al-Hazmi, H. (2017). Automotive fleet repair facility wastewater treatment using air/ZVI and air/ZVI/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes. *Archives of Environmental Protection*, 43, 24-31. <https://doi.org/10.1515/aep-2017-0024>
- Bogacki, J., Marcinowski, P., Naumczyk, J., & Wilinski, P. (2017). Cosmetic wastewater treatment using dissolved air flotation. *Archives of Environmental Protection*, 43, 65-73. <https://doi.org/10.1515/aep-2017-0018>
- Boguniewicz-Zablocka, J., Klosok-Bazan, I., Naddeo, V., & Mozejko, C. (2020). Cost-effective removal of COD in the pre-treatment of wastewater from the paper industry. *Water Science And Technology*, 81, 1345-1353. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.328>
- Brienza, M., Manasfi, R., Sauvêtre, A., & Chiron, S. (2020). Nitric oxide reactivity accounts for N-nitroso-ciprofloxacin formation under nitrate-reducing conditions. *Water Research*, 185, Article 116293. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116293>
- Brosler, P., Girao, A., Silva, R., Tedim, J., & Oliveira, F. (2023). Electrochemical Advanced Oxidation Processes Using Diamond Technology: A Critical Review. *Environments*, 10, Article 15. <https://doi.org/10.3390/environments10020015>
- Business Council for Sustainable Development (BCSD) Portugal. (2024, junho 12). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. <https://ods.pt/ods/>
- Butler, E., Hung, Y., Yeh, R., & Al Ahmad, M. (2011). Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, 3, 495-525. <https://doi.org/10.3390/w3020495>
- Cai, T., Lin, H., Liu, Z., Chen, K., Lin, Y., Xi, Y., & IOP. (2019, 2019-01-01). *Starch wastewater treatment technology*. 5th International Conference On Advances In Energy, Environment And Chemical Engineering, Shanghai, China. <https://doi:10.1088/1755-1315/358/2/022054>
- Cainglet, A., Tesfamariam, A., & Heiderscheidt, E. (2020). Organic polyelectrolytes as the sole precipitation agent in municipal wastewater treatment. *Journal Of Environmental Management*, 271, Article 111002. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111002>
- Cano, P., Jaramillo-Baquero, M., Zúñiga-Benítez, H., Londoño, Y., & Peñuela, G. (2020). Use of simulated sunlight radiation and hydrogen peroxide in azithromycin removal from aqueous solutions: Optimization & mineralization analysis. *Emerging Contaminants*, 6, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.12.004>
- Cartwright, M. (2012, May 22). *Minoan Architecture*. World History Encyclopedia. [https://www.worldhistory.org/Minoan\\_Architecture/](https://www.worldhistory.org/Minoan_Architecture/)

- Carvalho, J., Araujo, J., & Castro, F. (2011). Alternative Low-cost Adsorbent for Water and Wastewater Decontamination Derived from Eggshell Waste: An Overview. *Waste And Biomass Valorization*, 2, 157-167. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9058-y>
- Castillo-Suárez, L., Sierra-Sánchez, A., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., & Teutli-Sequeira, E. (2023). A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 20, 10553-10590. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04810-2>
- Chakinala, A., Gogate, P., Burgess, A., & Bremner, D. (2009). Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing. *Chemical Engineering Journal*, 152, 498-502. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.018>
- Chen, B., Chen, Y., Xu, L., Zhang, Y., & Li, H. (2020, 2020-01-01). *Research and development on industrial heavy metal wastewater treatment technology*. 2020 6th International Conference On Energy, Environment And Materials Science, Hulun Buir, China. <https://doi:10.1088/1755-1315/585/1/012051>
- Chen, Y., Gao, Y., Liu, T., Zhang, Z., & Li, W. (2022). Activated persulfate by iron-carbon micro electrolysis used for refractory organics degradation in wastewater: a review. *Water Science and Technology*, 86, 690-713. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.254>
- Chhetri, R., Klupsch, E., Andersen, H., & Jensen, P. (2018). Treatment of Arctic wastewater by chemical coagulation, UV and peracetic acid disinfection. *Environmental Science And Pollution Research*, 25, 32851-32859. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8585-5>
- Chhetri, T., Cunningham, G., Suresh, D., Shanks, B., Kannan, R., Upendran, A., & Afrasiabi, Z. (2022). Wastewater Treatment Using Novel Magnetic Nanosponges. *Water*, 14, Article 505. <https://doi.org/10.3390/w14030505>
- Chiang, H., Choa, C., Chen, S., & Tsai, M. (2003). The reuse of biosludge as an adsorbent from a petrochemical wastewater treatment plant. *Journal Of The Air & Waste Management Association*, 53, 1042-1051. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466259>
- Cho, B., & Suzuki, M. (1980). Activated Carbon by Pyrolysis of Sludge From Pulp-Mill Wastewater-Treatment. *Journal Of Chemical Engineering Of Japan*, 13, 463-467. <https://doi.org/10.1252/jcej.13.463>
- Chua, S., Malek, M., Chong, F., Sujarwo, W., & Ho, Y. (2019). Red Lentil (*Lens culinaris*) Extract as a Novel Natural Coagulant for Turbidity Reduction: An Evaluation, Characterization and Performance Optimization Study. *Water*, 11, Article 1686. <https://doi.org/10.3390/w11081686>
- Chua, S., Show, P., Chong, F., & Ho, Y. (2020). Lentil waste as novel natural coagulant for agricultural wastewater treatment. *Water Science And Technology*, 82, 1833-1847. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.409>
- Cid, C., Qu, Y., & Hoffmann, M. (2018). Design and preliminary implementation of onsite electrochemical wastewater treatment and recycling toilets for the developing world. *Environmental Science-Water Research & Technology*, 4, 1439-1450. <https://doi.org/10.1039/c8ew00209f>

## Referências Bibliográficas

- Clarivate. (2024, 06 de junho). *Document Types*. <https://webofscience.help.clarivate.com/en-us/Content/document-types.html>
- Costa, D., Silva, G & Assunção, M. (2023). Scopus vs. Web of Science: uma avaliação comparativa das principais bases de dados para a pesquisa académica. *Cadernos do FNDE*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10777653>
- Costa, T., Lopes, S. e Fernández-Llimós, F. (2012, outubro, 18-20). *A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: indicadores e ferramentas*. [Comunicação]. Congresso Nacional de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas, Lisboa. <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/4620>
- Crini, G & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D., Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>
- Cristóvão, R., Gonçalves, C., Botelho, C., Martins, R., Loureiro, J., & Boaventura, R. (2015). Fish canning wastewater treatment by activated sludge: Application of factorial design optimization Biological treatment by activated sludge of fish canning wastewater. *Water Resources And Industry*, 10, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2015.03.001>
- Crousier, C., Pic, J., Albet, J., Baig, S., & Roustan, M. (2016). Urban Wastewater Treatment by Catalytic Ozonation. *Ozone-Science & Engineering*, 38, 3-13. <https://doi.org/10.1080/01919512.2015.1113119>
- Dang, J., Wang, H., & Wang, C. (2021). Adsorption of Toxic Zinc by Functionalized Lignocellulose Derived from Waste Biomass: Kinetics, Isotherms and Thermodynamics. *Sustainability*, 13, Article 10673. <https://doi.org/10.3390/su131910673>
- Das, N., Ojha, N., & Mandal, S. (2021). Wastewater treatment using plant-derived bioflocculants: green chemistry approach for safe environment. *Water Science And Technology*, 83, 1797-1812. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.100>
- Dawood, A., & Li, Y. (2013). Modeling and Optimization of New Flocculant Dosage and pH for Flocculation: Removal of Pollutants from Wastewater. *Water*, 5, 342-355. <https://doi.org/10.3390/w5020342>
- Delgado, A. (2023-2024). *Curso online de Web of Science*. Clarivate. <https://clarivate.libguides.com/europe/portugal>
- De Tuesta, J., Roman, F., Marques, V., Silva, A., Silva, A., Bosco, T., & Gomes, H. (2022). Performance and modeling of Ni(II) adsorption from low concentrated wastewater on carbon microspheres prepared from tangerine peels by FeCl<sub>3</sub>-assisted hydrothermal carbonization. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 10, Article 108143. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108143>
- De Witte, B., Van Langenhove, H., Demeestere, K., Saelens, K., De Wispelaere, P., & Dewulf, J. (2010). Ciprofloxacin ozonation in hospital wastewater treatment plant effluent: Effect of pH and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Chemosphere*, 78, 1142-1147. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.026>

- De-La-Vega, D., González, C., Escalante, C., Gallego, J., Salamanca, M., & Manrique-Losada, L. (2018). Use of faujasite-type zeolite for ion adsorption in municipal wastewater. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 9, 184-208. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-08>
- Deng, M., Wu, K., Yang, T., Yu, D., Liu, G., Gong, S., & Petru, M. (2022). Construction of Novel Electro-Fenton Systems by Magnetically Decorating Zero-Valent Iron onto RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub>/Ti Electrode for Highly Efficient Pharmaceutical Wastewater Treatment. *Water*, 14, Article 1044. <https://doi.org/10.3390/w14071044>
- Deng, Y. & Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- Ding, X., Ai, Z., & Zhang, L. (2014). A dual-cell wastewater treatment system with combining anodic visible light driven photoelectro-catalytic oxidation and cathodic electro-Fenton oxidation. *Separation And Purification Technology*, 125, 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.046>
- Dlamini, N., Basson, A., & Pullabhotla, V. (2019). Optimization and Application of Biofloculant Passivated Copper Nanoparticles in the Wastewater Treatment. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 16, Article 2185. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122185>
- Doekhi-Bennani, Y., Leilabady, N., Fu, M., Rietveld, L., van der Hoek, J., & Heijman, S. (2021). Simultaneous removal of ammonium ions and sulfamethoxazole by ozone regenerated high silica zeolites. *Water Research*, 188, Article 116472. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116472>
- Dong, G., Chen, B., Liu, B., Hounjet, L., Cao, Y., Stoyanov, S., & Zhang, B. (2022). Advanced oxidation processes in microreactors for water and wastewater treatment: Development, challenges, and opportunities. *Water Research*, 211, Article 118047. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118047>
- Dong, L., Shan, C., Liu, Y., Sun, H., Yao, B., Gong, G., & Wang, S. (2022). Characterization and Mechanistic Study of Heavy Metal Adsorption by Facile Synthesized Magnetic Xanthate-Modified Chitosan/Polyacrylic Acid Hydrogels. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 19, Article 11123. <https://doi.org/10.3390/ijerph191711123>
- Dong, S., Mu, Y., & Sun, X. (2019). Removal of toxic metals using ferrate(VI): a review. *Water Science And Technology*, 80, 1213-1225. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.376>
- Ebba, M., Asaithambi, P., & Alemayehu, E. (2021). Investigation on operating parameters and cost using an electrocoagulation process for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 11, Article 175. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01517-y>
- Edet, U., & Ifelebuegu, A. (2020). Kinetics, Isotherms, and Thermodynamic Modeling of the Adsorption of Phosphates from Model Wastewater Using Recycled Brick Waste. *Processes*, 8, Article 665. <https://doi.org/10.3390/pr8060665>
- El Messaoudi, N., El Khomri, M., Fernine, Y., Bouich, A., Lacherai, A., Jada, A., & Lima, E. (2022). Hydrothermally engineered *Eriobotrya japonica* leaves /MgO nanocomposites with potential applications in wastewater treatment. *Groundwater For Sustainable Development*, 16, Article 100728. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100728>

## Referências Bibliográficas

- ElBastamy, E., Ibrahim, L., Ghandour, A., Zelenakova, M., Vranayova, Z., & Abu-Hashim, M. (2021). Efficiency of Natural Clay Mineral Adsorbent Filtration Systems in Wastewater Treatment for Potential Irrigation Purposes. *Sustainability*, 13, Article 5738. <https://doi.org/10.3390/su13105738>
- Elkhatib, D., Oyanedel-Craver, V., & Carissimi, E. (2021). Electrocoagulation applied for the removal of microplastics from wastewater treatment facilities. *Separation And Purification Technology*, 276, Article 118877. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118877>
- Elshabrawy, S., Elhussieny, A., Taha, M., Pal, K., & Fahim, I. (2023). Wastewater treatment via sugarcane bagasse pulp. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 20, 12405-12416. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04831-x>
- Farias, K., Guimaraes, R., Oliveira, K., Nazario, C., Ferencz, J., Wender, H., & Chen, W. (2023). Banana Peel Powder Biosorbent for Removal of Hazardous Organic Pollutants from Wastewater. *Toxics*, 11, Article 664. <https://doi.org/10.3390/toxics11080664>
- Farzanehsa, M., Vaughan, L., Zamyadi, A., & Khan, S. (2023). Comparison of UV-Cl and UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation processes in the degradation of contaminants from water and wastewater: A review. *Water And Environment Journal*, 37, 633-643. <https://doi.org/10.1111/wej.12868>
- Feijoo, S., Yu, X., Kamali, M., Appels, L., & Dewil, R. (2023). Generation of oxidative radicals by advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment: a mechanistic, environmental and economic review. *Reviews In Environmental Science And Bio-Technology*, 22, 205-248. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09645-4>
- Fernández-Marchante, C., Souza, F., Millán, M., Lobato, J., & Rodrigo, M. (2021). Improving sustainability of electrolytic wastewater treatment processes by green powering. *Science Of The Total Environment*, 754, Article 142230. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142230>
- Ferreira, S., & Waelkens, B. (2009). Minimization of water treatment plant sludge production with polyaluminium chloride application and its disposal in wastewater treatment plants. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 14, 317-326. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000300005>
- Fetene, Y., & Addis, T. (2020). Adsorptive Removal of Phosphate From Wastewater Using Ethiopian Rift Pumice: Batch Experiment. *Air Soil And Water Research*, 13, Article 1178622120969658. <https://doi.org/10.1177/1178622120969658>
- Fritzen, R., & Benetti, A. (2021). Phosphorus removal in domestic wastewater treatment plant by calcined eggshell. *Water Science And Technology*, 84, 995-1010. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.263>
- Führ, M. (2019). *Arquitetura Minóica em Creta*. Tradução de Cartwright, M. (2012, May 22). Minoan Architecture. *World History Encyclopedia*. <https://apaixonadosporhistoria.com.br/artigo/192/arquitetura-minoica-em-creta>
- Gamba, M., Flores, F., Madejová, J., & Sánchez, R. (2015). Comparison of Imazalil Removal onto Montmorillonite and Nanomontmorillonite and Adsorption Surface Sites Involved: An Approach for Agricultural Wastewater Treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54, 1529-1538. <https://doi.org/10.1021/ie5035804>

- Garcia-Costa, A., & Casas, J. (2022). Intensification strategies for thermal H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-based advanced oxidation processes: Current trends and future perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, 9, Article 100228. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100228>
- Ghosh, N., Das, S., Biswas, G., & Haldar, P. (2022). Review on some metal oxide nanoparticles as effective adsorbent in wastewater treatment. *Water Science And Technology*, 85, 3370-3395. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.153>
- GilPavas, E., Correa-Sánchez, S., & Acosta, D. (2019). Using scrap zero valent iron to replace dissolved iron in the Fenton process for textile wastewater treatment: Optimization and assessment of toxicity and biodegradability. *Environmental Pollution*, 252, 1709-1718. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.104>
- Gómez-López, M. D., Bayo, J., García-Cascales, M. S., Angosto, J. M., (2009). Decision Support in Disinfection Technologies for Treated Wastewater Reuse. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2009.06.008>
- Gomis, J., Gonçalves, M., Vercher, R., Sabater, C., Castillo, M., Prevot, A., & Arques, A. (2015). Determination of photostability, biocompatibility and efficiency as photo-Fenton auxiliaries of three different types of soluble bio-based substances (SBO). *Catalysis Today*, 252, 177-183. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2014.10.015>
- Gomis, J., Vercher, R., Amat, A., Mártire, D., González, M., Prevot, A., & Carlos, L. (2013). Application of soluble bio-organic substances (SBO) as photocatalysts for wastewater treatment: Sensitizing effect and photo-Fenton-like process. *Catalysis Today*, 209, 176-180. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.08.036>
- González, C., Pariente, M., Molina, R., Espina, L., Masa, M., Bernal, V., & Martínez, F. (2023). Increasing biodegradability of a real amine-contaminated spent caustic problematic stream through WAO and CWAO oxidation using a high specific surface catalyst from petcoke. *Chemical Engineering Journal*, 460, Article 141692. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141692>
- Goodarzi, D., Abolfathi, S., & Borzooei, S. (2020). Modelling solute transport in water disinfection systems: Effects of temperature gradient on the hydraulic and disinfection efficiency of serpentine chlorine contact tanks. *Journal Of Water Process Engineering*, 37, Article 101411. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101411>
- Gopalakrishnan, G., Jeyakumar, R., & Somanathan, A. (2023). Challenges and Emerging Trends in Advanced Oxidation Technologies and Integration of Advanced Oxidation Processes with Biological Processes for Wastewater Treatment. *Sustainability*, 15, Article 4235. <https://doi.org/10.3390/su15054235>
- Grant, M.J., Booth, A., (2009). A Typology of Reviews: An Analysis of 14 Review Types and Associated Methodologies. *Health Information and Libraries Journal*. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Gu, S., Lian, F., Yan, K., & Zhang, W. (2019). Application of polymeric ferric sulfate combined with cross-frequency magnetic field in the printing and dyeing wastewater treatment. *Water Science And Technology*, 80, 1562-1570. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.401>

## Referências Bibliográficas

- Guerra-Rodriguez, S., Rodriguez, E., Singh, D. N., Rodriguez-Chueca, J. (2018). Assessment of Sulfate Radical-Based Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment: A Review. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w10121828>
- Gul, E., Alrawashdeh, K., Masek, O., Skreiberg, O., Corona, A., Zampilli, M., & Fantozzi, F. (2021). Production and use of biochar from lignin and lignin-rich residues (such as digestate and olive stones) for wastewater treatment. *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, 158, Article 105263. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105263>
- Gupta, A., Kumar, M., Sharma, R., Tripathi, R., Kumar, V., & Thakur, I. (2023). Screening and characterization of biofloculant isolated from thermotolerant *Bacillus* sp. ISTVK1 and its application in wastewater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 30, Article 103135. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103135>
- Gutierrez, A., Dziubla, T., & Hilt, J. (2017). Recent advances on iron oxide magnetic nanoparticles as sorbents of organic pollutants in water and wastewater treatment. *Reviews On Environmental Health*, 32, 111-117. <https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0063>
- Guévar, C., Hertz, A., Brackx, E., Barré, Y., & Grandjean, A. (2017). Mechanisms of strontium removal by a Ba-titanate material for the wastewater treatment. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 5, 4948-4957. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.024>
- Hagemann, N., Schmidt, H., Kägi, R., Böhler, M., Sigmund, G., Maccagnan, A., & Bucheli, T. (2020). Wood-based activated biochar to eliminate organic micropollutants from biologically treated wastewater. *Science Of The Total Environment*, 730, Article 138417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138417>
- Hallmann, E., Tomczak-Wandzel, R., & Medrzycka, K. (2012). Combined Chemical-Biological Treatment of Effluents From Soil Remediation Processes by Surfactants Solutions Flushing. *Ecological Chemistry And Engineering S-Chemia I Inzynieria Ekologiczna S*, 19, 9-18. <https://doi.org/10.2478/v10216-011-0001-3>
- Halysh, V., Trus, I., Nikolaichuk, A., Skiba, M., Radovenchyk, I., Deykun, I., & Sirenko, L. (2020). Spent Biosorbents as Additives in Cement Production. *Journal of Ecological Engineering*, 21, 131-138. <https://doi.org/10.12911/22998993/116328>
- Hamdan, M., Sublaban, E., Al-Asfar, J., & Banisaid, M. (2023). Wastewater Treatment Using Activated Carbon Produced from Oil Shale. *Journal Of Ecological Engineering*, 24, 131-139. <https://doi.org/10.12911/22998993/156664>
- Hand, S., & Cusick, R. (2021). Electrochemical Disinfection in Water and Wastewater Treatment: Identifying Impacts of Water Quality and Operating Conditions on Performance. *Environmental Science & Technology*, 55, 3470-3482. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06254>
- He, Q., Wang, H., Xu, C., Zhang, J., Zhang, W., Zou, Z., & Yang, K. (2016). Feasibility and optimization of wastewater treatment by chemically enhanced primary treatment (CEPT): a case study of Huangshi. *Chemical Speciation And Bioavailability*, 28, 209-215. <https://doi.org/10.1080/09542299.2016.1247657>

- Heidari, M., Malakootian, M., Boczkaj, G., Sun, X., Tao, Y., Sonawane, S., & Mehdizadeh, H. (2021). Evaluation and start-up of an electro-Fenton-sequencing batch reactor for dairy wastewater treatment. *Water Resources And Industry*, 25, Article 100149. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100149>
- Heim, C., de Vivanco, M., Rajab, M., Müller, E., Letzel, T., & Helmreich, B. (2015). Rapid inactivation of waterborne bacteria using boron-doped diamond electrodes. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 12, 3061-3070. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0722-9>
- Hira, N., Lock, S., Shoparwe, N., Lock, I., Lim, L., Yiin, C., & Hassam, M. (2023). Review of Adsorption Studies for Contaminant Removal from Wastewater Using Molecular Simulation. *Sustainability*, 15, Article 1510. <https://doi.org/10.3390/su15021510>
- Hodge, A.T. (1962). *Roman aqueducts & water supply*. Gerald Duck-worth & Co. Ltd.
- Hu, W., Cheng, S., Xia, H., Zhang, L., Jiang, X., Zhang, Q., & Chen, Q. (2019). Waste phenolic resin derived activated carbon by microwave-assisted KOH activation and application to dye wastewater treatment. *Green Processing and Synthesis*, 8, 408-415. <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0008>
- Huang, Y., Wang, Z., Liu, Q., Wang, X., Yuan, Z., & Liu, J. (2017). Effects of chloride on PMS-based pollutant degradation: A substantial discrepancy between dyes and their common decomposition intermediate (phthalic acid)]. *Chemosphere*, 187, 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.120>
- Hung, Y., Aziz, H., Ramli, S., Paul, H., Huhnke, C., & Adesanmi, B. (2020). Chemical waste and allied products. *Water Environment Research*, 92, 1504-1509. <https://doi.org/10.1002/wer.1399>
- Hussain, S., Aneggi, E., & Goi, D. (2021). Catalytic activity of metals in heterogeneous Fenton-like oxidation of wastewater contaminants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2405-2424. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01185-z>
- Ibrahim, I., Tsubota, T., Hassan, M., & Andou, Y. (2021). Surface Functionalization of Biochar from Oil Palm Empty Fruit Bunch through Hydrothermal Process. *Processes*, 9, Article 149. <https://doi.org/10.3390/pr9010149>
- Ibrahim, Q., Creedon, L., & Gharbia, S. (2022). A Literature Review of Modelling and Experimental Studies of Water Treatment by Adsorption Processes on Nanomaterials. *Membranes*, 12,
- Instituto Nacional de Estatística (2023). Estações de tratamento de águas residuais (N.º) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual. [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_indicadores&indOcorrCod=0009607&xlang=pt&contexto=bd&selTab=tab2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0009607&xlang=pt&contexto=bd&selTab=tab2)
- Instituto Nacional de Estatística (2023). Águas residuais drenadas (Série 2011) (m<sup>3</sup>) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Origem das águas residuais (Sector); Anual. Águas residuais drenadas por habitante (Série 2011) (m<sup>3</sup>/ hab.) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual. Águas residuais tratadas em estações de tratamento de águas residuais (m<sup>3</sup>) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual. Proporção de alojamentos servidos por drenagem de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual. Proporção de alojamentos servidos por tratamento de águas residuais (%) por

## Referências Bibliográficas

- Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual.  
[https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_unid\\_territorial&menuBOUI=13707095&contexto=ut&selTab=tab3](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_unid_territorial&menuBOUI=13707095&contexto=ut&selTab=tab3)
- Irshad, M., Sattar, S., Nawaz, R., Al-Hussain, S., Rizwan, M., Bukhari, A., & Zaki, M. (2023). Enhancing chromium removal and recovery from industrial wastewater using sustainable and efficient nanomaterial: A review. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 263, Article 115231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115231>
- Ishak, S., Murshed, M., Akil, H., Ismail, N., Rasib, S., & Al-Gheethi, A. (2020). The Application of Modified Natural Polymers in Toxicant Dye Compounds Wastewater: A Review. *Water*, 12, Article 2032. <https://doi.org/10.3390/w12072032>
- Jamil, T., Yasin, S., Ramzan, N., Aslam, H., Ikhlaq, A., Zafar, A., & Hassan, A. (2023). Bentonite-Clay/CNT-Based Nano Adsorbent for Textile Wastewater Treatment: Optimization of Process Parameters. *Water*, 15, Article 3197. <https://doi.org/10.3390/w15183197>
- Jawad, A., Chen, Z., & Yin, G. (2016). Bicarbonate activation of hydrogen peroxide: A new emerging technology for wastewater treatment. *Chinese Journal Of Catalysis*, 37, 810-825. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61100-7](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61100-7)
- Jiang, H., Chen, H., Duan, Z., Huang, Z., & Wei, K. (2023). Research progress and trends of biochar in the field of wastewater treatment by electrochemical advanced oxidation processes (EAOPs): a bibliometric analysis. *Journal Of Hazardous Materials Advances*, 10, Article 100305. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100305>
- Jing, G., Ren, S., Gao, Y., Sun, W., & Gao, Z. (2020). Electrocoagulation: A Promising Method to Treat and Reuse Mineral Processing Wastewater with High COD. *Water*, 12, Article 595. <https://doi.org/10.3390/w12020595>
- Johnson, M., & Mehrvar, M. (2022). Treatment of Actual Winery Wastewater by Fenton-like Process: Optimization to Improve Organic Removal, Reduce Inorganic Sludge Production and Enhance Co-Treatment at Municipal Wastewater Treatment Facilities. *Water*, 14, Article 39. <https://doi.org/10.3390/w14010039>
- Joseph, B., Kaetzl, K., Hensgen, F., Schäfer, B., & Wachendorf, M. (2020). Sustainability assessment of activated carbon from residual biomass used for micropollutant removal at a full-scale wastewater treatment plant. *Environmental Research Letters*, 15, Article 064023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8330>
- Joshi, M. A. (2014). Bibliometric indicators for evaluating the quality of scientific publications. *Journal of Contemporary Dental Practice*. 15(2): 258-262.
- Kahoush, M., Behary, N., Guan, J., Cayla, A., Mutel, B., & Nierstrasz, V. (2021). Genipin-mediated immobilization of glucose oxidase enzyme on carbon felt for use as heterogeneous catalyst in sustainable wastewater treatment. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 9, Article 105633. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105633>
- Kamyab, H., Yuzir, M., Abdullah, N., Quan, L., Riyadi, F., Marzouki, R., & Rakhmania. (2022). Recent Applications of the Electrocoagulation Process on Agro-Based Industrial Wastewater: A Review. *Sustainability*, 14, Article 1985. <https://doi.org/10.3390/su14041985>

- Karic, N., Maia, A., Teodorovic, A., Atanasova, N., Langergraber, G., Crini, G., & Dolic, M. (2022). Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in)organic pollutants in wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal Advances*, 9, Article 100239. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100239>
- Kasera, N., Kolar, P., & Hall, S. (2022). Nitrogen-doped biochars as adsorbents for mitigation of heavy metals and organics from water: a review. *Biochar*, 4, Article 17. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00145-2>
- Khan, M., Ali, S., Shahadat, M., & Sagadevan, S. (2022). Applications of polyaniline-impregnated silica gel-based nanocomposites in wastewater treatment as an efficient adsorbent of some important organic dyes. *Green Processing And Synthesis*, 11, 617-630. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-0063>
- Kogut, I., Armbruster, F., Polak, D., Kaur, S., Hussy, S., Thiem, T., & Szwast, M. (2022). Antibacterial, Antifungal, and Antibiotic Adsorption Properties of Graphene-Modified Nonwoven Materials for Application in Wastewater Treatment Plants. *Processes*, 10, Article 2051. <https://doi.org/10.3390/pr10102051>
- Kolakovic, S., Stefanovic, D., Lemic, J., Milicevic, D., Tomovic, S., Trajkovic, S., & Milenkovic, S. (2014). Forming a Filter Medium from Zeolite Modified with Sdbac for Wastewater Treatment Process. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 20, 361-369. <https://doi.org/10.2298/CICEQ121218018K>
- Kolakovic, S., Stefanovic, D., Milicevic, D., Trajkovic, S., Milenkovic, S., Kolakovic, S., & Anđelkovic, L. (2013). Effects of Reactive Filters Based on Modified Zeolite in Dairy Industry Wastewater Treatment Process. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 19, 583-592. <https://doi.org/10.2298/CICEQ120629092K>
- Kolya, H., & Kang, C. (2023). Bio-Based Polymeric Flocculants and Adsorbents for Wastewater Treatment. *Sustainability*, 15, Article 9844. <https://doi.org/10.3390/su15129844>
- Krishnan, S., Rawindran, H., Sinnathambi, C., & Lim, J. (2017, 2017-01-01). *Comparison of various advanced oxidation processes used in remediation of industrial wastewater laden with recalcitrant pollutants*. 29th Symposium Of Malaysian Chemical Engineers (Somche) 2016, Miri, Malaysia. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/206/1/012089>
- Kristianto, H., Rahman, H., Prasetyo, S., & Sugih, A. (2019). Removal of Congo red aqueous solution using *Leucaena leucocephala* seed's extract as natural coagulant. *Applied Water Science*, 9, Article 88. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0972-2>
- Kumar, V., Mohapatra, T., Dharmadhikari, S., & Ghosh, P. (2020). A Review Paper on Heterogeneous Fenton Catalyst: Types of Preparation, Modification Techniques, Factors Affecting the Synthesis, Characterization, and Application in the Wastewater Treatment. *Bulletin Of Chemical Reaction Engineering And Catalysis*, 15, 1-34. <https://doi.org/10.9767/bcrec.15.1.4374.1-34>
- Kurian, M. (2021). Advanced oxidation processes and nanomaterials - a review. *Cleaner Engineering And Technology*, 2, Article 100090. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100090>

## Referências Bibliográficas

- Kurniawan, S., Abdullah, S., Imron, M., Said, N., Ismail, N., Hasan, H., & Purwanti, I. (2020). Challenges and Opportunities of Biocoagulant/Biofloculant Application for Drinking Water and Wastewater Treatment and Its Potential for Sludge Recovery. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*, Article 9312. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>
- Kyrii, S., Dontsova, T., Kosogina, I., Astrelin, I., Klymenko, N., & Nechyporuk, D. (2020). Local Wastewater Treatment by Effective Coagulants Based on Wastes. *Journal of Ecological Engineering*, *21*, 34-41. <https://doi.org/10.12911/22998993/122184>
- Labrada, K., Cuello, D., Sánchez, I., Batle, M., Manero, M., Barthe, L., & Jáuregui-Haza, U. (2018). Optimization of ciprofloxacin degradation in wastewater by homogeneous sono-Fenton process at high frequency. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, *53*, 1139-1148. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1530177>
- Lacson, C., de Luna, M., Dong, C., Garcia-Segura, S., & Lu, M. (2018). Fluidized-bed Fenton treatment of imidacloprid: Optimization and degradation pathway. *Sustainable Environment Research*, *28*, 309-314. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.09.001>
- Lajayer, B., Najafi, N., Moghiseh, E., Mosaferi, M., & Hadian, J. (2020). Effects of gamma irradiation on physicochemical and biological characteristics of wastewater effluent and sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *17*, 1021-1034. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02410-7>
- Lamaming, J., Saalah, S., Rajin, M., Ismail, N., & Yaser, A. (2022). A Review on Bamboo as an Adsorbent for Removal of Pollutants for Wastewater Treatment. *International Journal Of Chemical Engineering*, 2022, Article 7218759. <https://doi.org/10.1155/2022/7218759>
- Lee, C., Chong, M., Robinson, J., & Binner, E. (2014). A Review on Development and Application of Plant-Based Biofloculants and Grafted Biofloculants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *53*, 18357-18369. <https://doi.org/10.1021/ie5034045>
- Leiden University (2024). *VOSviewer Visualizing scientific landscapes*. <https://www.vosviewer.com/>
- Li, H., Wu, S., Du, C., Zhong, Y., & Yang, C. (2020). Preparation, Performances, and Mechanisms of Microbial Flocculants for Wastewater Treatment. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, *17*, Article 1360. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041360>
- Li, L., Fan, M., Brown, R., Koziel, J., & van Leeuwenach, J. (2009). Production of a new wastewater treatment coagulant from fly ash with concomitant flue gas scrubbing. *Journal of Hazardous Materials*, *162*, 1430-1437. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.035>
- Li, S., Yao, Y., Zhao, T., Wang, M., & Wu, F. (2019). Biochars preparation from waste sludge and composts under different carbonization conditions and their Pb(II) adsorption behaviors. *Water Science And Technology*, *80*, 1063-1075. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.353>
- Li, Y., Jawad, A., Khan, A., Lu, X., Chen, Z., Liu, W., & Yin, G. (2016). Synergistic degradation of phenols by bimetallic CuO-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> system]. *Chinese Journal Of Catalysis*, *37*, 963-970. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61092-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61092-0)

- Lichtfouse, E., Morin-Crini, N., Fourmentin, M., Zemmouri, H., Nascimento, I., Queiroz, L., & Crini, G. (2019). Chitosan for direct bioflocculation of wastewater. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 1603-1621. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00900-1>
- Lin, Y., Dhib, R., & Mehrvar, M. (2021). Recent Advances in Dynamic Modeling and Process Control of PVA Degradation by Biological and Advanced Oxidation Processes: A Review on Trends and Advances. *Environments*, 8, Article 116. <https://doi.org/10.3390/environments8110116>
- Linklater, N., & Örmeci, B. (2014). Evaluation of the adenosine triphosphate (ATP) bioluminescence assay for monitoring effluent quality and disinfection performance. *Water Quality Research Journal Of Canada*, 49, 114-123. <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2013.110>
- Liu, F., Zhou, K., Chen, Q., Wang, A., & Chen, W. (2018). Comparative study on the synthesis of magnetic ferrite adsorbent for the removal of Cd(II) from wastewater. *Adsorption Science & Technology*, 36, 1456-1469. <https://doi.org/10.1177/0263617418779729>
- Liu, J., Chen, F., Yao, Q., Sun, Y., Huang, W., Wang, R., & Tian, J. (2020). Application and Prospect of Graphene and Its Composites in Wastewater Treatment. *Polish Journal Of Environmental Studies*, 29, 3965-3974. <https://doi.org/10.15244/pjoes/117660>
- Liu, J., Ren, N., Qu, C., Lu, S., Xiang, Y., & Liang, D. (2022). Recent Advances in the Reactor Design for Industrial Wastewater Treatment by Electro-Oxidation Process. *Water*, 14, Article 3711. <https://doi.org/10.3390/w14223711>
- Llanos, J., Cotillas, S., Cañizares, P., & Rodrigo, M. (2017). Electrocoagulation as a key technique in the integrated urban water cycle - A case study in the centre of Spain. *Urban Water Journal*, 14, 650-654. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1223322>
- Lobo, F., Wang, H., Huggins, T., Rosenblum, J., Linden, K., & Ren, Z. (2016). Low-energy hydraulic fracturing wastewater treatment via AC powered electrocoagulation with biochar. *Journal Of Hazardous Materials*, 309, 180-184. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.020>
- Lugo, L., Martín, A., Diaz, J., Pérez-Flórez, A., & Celis, C. (2020). Implementation of Modified Acacia Tannin by Mannich Reaction for Removal of Heavy Metals (Cu, Cr and Hg). *Water*, 12, Article 352. <https://doi.org/10.3390/w12020352>
- Ma, L., Jiang, C., Lin, Z., & Zou, Z. (2018). Microwave-Hydrothermal Treated Grape Peel as an Efficient Biosorbent for Methylene Blue Removal. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 15, Article 239. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020239>
- Maged, A., Abd El-Fattah, H., Kamel, R., Kharbish, S., & Elgarahy, A. (2023). A comprehensive review on sustainable clay-based geopolymers for wastewater treatment: circular economy and future outlook. *Environmental Monitoring And Assessment*, 195, Article 693. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11303-9>
- Makhtar, N., Idris, J., Musa, M., Andou, Y., Hamid, K., & Puasa, S. (2020). Plant-Based *Tacca leontopetaloides* Biopolymer Flocculant (TBPF) Produced High Removal of Turbidity, TSS, and Color for Leachate Treatment. *Processes*, 8, Article 527. <https://doi.org/10.3390/pr8050527>

## Referências Bibliográficas

- Mancuso, G., Langone, M., & Andreottola, G. (2020). A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications. *Journal Of Environmental Health Science And Engineering*, 18, 311-333. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00444-5>
- Maner, A.W. (1966). Public works in ancient Mesopotamia. *Civ. Engrg.*, 36(7), 50-51.
- Marmanis, D., Emmanouil, C., Fantidis, J., Thysiadou, A., & Marmani, K. (2022). Description of a Fe/Al Electrocoagulation Method Powered by a Photovoltaic System, for the (Pre-)Treatment of Municipal Wastewater of a Small Community in Northern Greece. *Sustainability*, 14, Article 4323. <https://doi.org/10.3390/su14074323>
- Maslon, A., & Czarnota, J. (2020). Efficiency of Brick Dust and Powdered Ceramsite in the Phosphorus Removal from Wastewater. *Journal Of Ecological Engineering*, 21, 63-71. <https://doi.org/10.12911/22998993/116346>
- Mateus, A., Torres, J., Marimon-Bolivar, W., & Pulgarín, L. (2021). Implementation of magnetic bentonite in food industry wastewater treatment for reuse in agricultural irrigation]. *Water Resources And Industry*, 26, Article 100154. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100154>
- Matos, J. S. (2003). Aspectos Históricos a Actuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano. *Engenharia Civil • UM*. 16: 13-23.
- Maynez-Navarro, O., Mendez-Rojas, M., Flores-Cervantes, D., & Sanchez-Salas, J. (2020). Hydroxyl Radical Generation by Recyclable Photocatalytic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZnO Nanoparticles for Water Disinfection. *Air Soil And Water Research*, 13. <https://doi.org/10.1177/1178622120970954>
- Mazeikiene, A., & Valentukeviciene, M. (2016). Removal of Ammonium Ions From Digested Sludge Fugate by Using Natural Zeolite. *Journal Of Environmental Engineering And Landscape Management*, 24, 176-184. <https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1172075>
- Meiramkulova, K., Jakupova, Z., Orynbekov, D., Tashenov, E., Kydyrbekova, A., Mkilima, T., & Inglezakis, V. (2020). Evaluation of Electrochemical Methods for Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment. *Sustainability*, 12, Article 5110. <https://doi.org/10.3390/su12125110>
- Meiramkulova, K., Mkilima, T., Kydyrbekova, A., Nikitin, Y., Zandybay, A., Khussainov, M., & Uryumtseva, T. (2021). Contribution of Electrolysis within an Integrated System for a Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment. *Sustainability*, 13, Article 12430. <https://doi.org/10.3390/su132212430>
- Meng, S., Wen, S., Han, G., Wang, X., & Feng, Q. (2022). Wastewater Treatment in Mineral Processing of Non-Ferrous Metal Resources: A Review. *Water*, 14, Article 726. <https://doi.org/10.3390/w14050726>
- Mestre, A., Viegas, R., Mesquita, E., Rosa, M., & Carvalho, A. (2022). Engineered pine nut shell derived activated carbons for improved removal of recalcitrant pharmaceuticals in urban wastewater treatment. *Journal Of Hazardous Materials*, 437, Article 129319. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129319>
- Metclaf and Eddy (1928). *American Sewerage Practice. I: Design of Sewers*. McGraw-Hill.

- Metin, S., & Çifçi, D. (2023). Chemical industry wastewater treatment by coagulation combined with Fenton and photo-Fenton processes. *Journal Of Chemical Technology And Biotechnology*, 98, 1158-1165. <https://doi.org/10.1002/jctb.7321>
- Mian, H., Hussain, S., & Gul-e-Nina. (2018). Optimization of sequencing batch reactor for wastewater treatment using chemically enhanced primary treatment as a pre-treatment. *Water Sa*, 44, 399-405. <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i3.07>
- Miralles-Cuevas, S., De la Obra, I., Gualda-Alonso, E., Soriano-Molina, P., López, J., & Pérez, J. (2021). Simultaneous Disinfection and Organic Microcontaminant Removal by UVC-LED-Driven Advanced Oxidation Processes. *Water*, 13, Article 1507. <https://doi.org/10.3390/w13111507>
- Monte, H. M. (coord.), Barreiros, A. M., Santos, M. T., Albuquerque, A. (2016). *Tratamento de Águas Residuais: Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Universidade da Beira Interior. <https://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/documents/ct5-trataguasresiduais.pdf>
- Mortadi, A., Chahid, E., Elmelouky, A., Chahbi, M., El Ghyati, N., Zaim, S., & El Moznine, R. (2020). Complex electrical conductivity as a new technique to monitor the coagulation-flocculation processes in the wastewater treatment of the textile Industry. *Water Resources And Industry*, 24, Article 100130. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2020.100130>
- Mpongwana, N., & Rathilal, S. (2022). A Review of the Techno-Economic Feasibility of Nanoparticle Application for Wastewater Treatment. *Water*, 14, Article 1550. <https://doi.org/10.3390/w14101550>
- Muddemann, T., Haupt, D., Sievers, M., & Kunz, U. (2019). Electrochemical Reactors for Wastewater Treatment. *Chembioeng Reviews*, 6, 142-156. <https://doi.org/10.1002/cben.201900021>
- Mudhoo, A., & Sillanpää, M. (2021). Magnetic nanoadsorbents for micropollutant removal in real water treatment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 4393-4413. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01289-6>
- Mukherjee, S., Pariatamby, A., Sahu, J., & Sen Gupta, B. (2013). Clarification of rubber mill wastewater by a plant based biopolymer - comparison with common inorganic coagulants. *Journal Of Chemical Technology And Biotechnology*, 88, 1864-1873. <https://doi.org/10.1002/jctb.4041>
- Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Irvani, S., & Varma, R. (2021). Carbon-based sustainable nanomaterials for water treatment: State-of-art and future perspectives. *Chemosphere*, 263, Article 128005. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128005>
- Needham, J.; Ling, W. and Gwei-Djen, L. (1971). *Science and Civilization in China – Vol.4: Physics and physical technology. III: Civil engineering and nautics*. Cambridge University Press.
- Olajire, A., & Bamigbade, L. (2021). Green synthesis of chitosan-based iron@silver nanocomposite as adsorbent for wastewater treatment. *Water Resources And Industry*, 26, Article 100158. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100158>

## Referências Bibliográficas

- Omran, I., Al-Saati, N., Al-Saati, H., Hashim, K., & Al-Saati, Z. (2021). Sustainability assessment of wastewater treatment techniques in urban areas of Iraq using multi-criteria decision analysis (MCDA). *Water Practice And Technology*, 16, 648-660. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.013>
- Oprckal, P., Mladenovic, A., Vidmar, J., Pranjić, A., Milacic, R., & Scancar, J. (2017). Critical evaluation of the use of different nanoscale zero-valent iron particles for the treatment of effluent water from a small biological wastewater treatment plant. *Chemical Engineering Journal*, 321, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.104>
- Orlandi, M., Filosa, N., Bettonte, M., Fendrich, M., Girardini, M., Battistini, T., & Miotello, A. (2019). Treatment of surfactant-rich industrial wastewaters with concentrated sunlight: toward solar wastewater remediation. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 16, 2109-2114. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2099-7>
- Papoutsakis, S., Miralles-Cuevas, S., Oller, I., Sanchez, J., Pulgarin, C., & Malato, S. (2015). Microcontaminant degradation in municipal wastewater treatment plant secondary effluent by EDDS assisted photo-Fenton at near-neutral pH: An experimental design approach. *Catalysis Today*, 252, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.02.005>
- Park, J., Han, Y., & Ji, S. (2018). Investigation of Mineral-Processing Wastewater Recycling Processes: A Pilot Study. *Sustainability*, 10, Article 3069. <https://doi.org/10.3390/su10093069>
- Pendlebury, D. (2008). *White Paper Using bibliometrics in evaluating Research*. Thomson Reuters.
- Peng, L., Wang, F., Zhang, D., Fang, C., van der Hoek, J., & Chu, W. (2021). Effect of oxidation ditch and anaerobic-anoxic-oxic processes on CX<sub>3</sub>R-type disinfection by-product formation during wastewater treatment. *Science Of The Total Environment*, 770, Article 145344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145344>
- Pervez, M., He, W., Zarra, T., Naddeo, V., & Zhao, Y. (2020). New Sustainable Approach for the Production of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Graphene Oxide-Activated Persulfate System for Dye Removal in Real Wastewater. *Water*, 12, Article 733. <https://doi.org/10.3390/w12030733>
- Piaskowski, K., & Zarzycki, P. (2020). Carbon-Based Nanomaterials as Promising Material for Wastewater Treatment Processes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, Article 5862. <https://doi.org/10.3390/ijerph17165862>
- Piras, F., Nakhla, G., Murgolo, S., De Ceglie, C., Mascolo, G., Bell, K., & Santoro, D. (2022). Optimal integration of vacuum UV with granular biofiltration for advanced wastewater treatment: Impact of process sequence on CECs removal and microbial ecology. *Water Research*, 220, Article 118638. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118638>
- PopulationPyramid.net (2024, dezembro 16). Lista de países ordenados pelo tamanho da população. <https://www.populationpyramid.net/pt/popula%C3%A7%C3%A3o/2024/>
- Pradhan, S., Kauppinen, A., Martikainen, K., Pitkänen, T., Kusnetsov, J., Miettinen, I., & Heinonen-Tanski, H. (2013). Microbial reduction in wastewater treatment using Fe<sup>3+</sup> and Al<sup>3+</sup> coagulants and PAA disinfectant. *Journal of Water and Health*, 11, 581-589. <https://doi.org/10.2166/wh.2013.241>

- Pérez, J., Llanos, J., Sáez, C., López, C., Cañizares, P., & Rodrigo, M. (2018). Development of an innovative approach for low-impact wastewater treatment: A microfluidic flow-through electrochemical reactor. *Chemical Engineering Journal*, 351, 766-772. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.150>
- Pérez, J., Llanos, J., Sáez, C., López, C., Cañizares, P., & Rodrigo, M. (2019). On the design of a jet-aerated microfluidic flow-through reactor for wastewater treatment by electro-Fenton. *Separation And Purification Technology*, 208, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.021>
- Qu, J., Zhang, D., Li, Y., Wang, P., Mao, Y., Zhang, T., & Li, Y. (2024). In situ synthesized S-type heterojunction Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> enable efficient NIR light-driven H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> activation for water purification. *Applied Catalysis B-Environment And Energy*, 340, Article 123246. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123246>
- Raashid, M., Kazmi, M., Ikhlaq, A., Iqbal, T., Sulaiman, M., & Shakeel, A. (2021). Degradation of Aqueous CONFIDOR(R) Pesticide by Simultaneous TiO<sub>2</sub> Photocatalysis and Fe-Zeolite Catalytic Ozonation. *Water*, 13, Article 3327. <https://doi.org/10.3390/w13233327>
- Radelyuk, I., Tussupova, K., Zhapargazinova, K., Yelubay, M., & Persson, M. (2019). Pitfalls of Wastewater Treatment in Oil Refinery Enterprises in Kazakhstan-A System Approach. *Sustainability*, 11, Article 1618. <https://doi.org/10.3390/su11061618>
- Rahman, R., El-Kamash, A., & Hung, Y. (2022). Applications of Nano-Zeolite in Wastewater Treatment: An Overview. *Water*, 14, Article 137. <https://doi.org/10.3390/w14020137>
- Raji, M., & Mirbagheri, S. (2021). A global trend of Fenton-based AOPs focused on wastewater treatment: a bibliometric and visualization analysis. *Water Practice And Technology*, 16, 19-34. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.099>
- Raman, C., Sellappa, K., & Mkandawire, M. (2021). Facile one step green synthesis of iron nanoparticles using grape leaves extract: textile dye decolorization and wastewater treatment. *Water Science And Technology*, 83, 2242-2258. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.140>
- Rayaroth, M. P., Aravindakumar, C. T., Shah, N. S., Boczkaj, G. (2022). Advanced oxidation processes (AOPs) based wastewater treatment - unexpected nitration side reactions-a serious environmental issue: A review. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133002>
- Ribeiro, J., Cruz, N., Neves, M., Rodrigues, S., Tarelho, L., & Nunes, M. (2023). Granulated biomass fly ash coupled with fenton process for pulp and paper wastewater treatment. *Environmental Pollution*, 317, Article 120777. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120777>
- Ribeiro, P., & Nunes, M. (2021). Recent trends and developments in Fenton processes for industrial wastewater treatment-A critical review. *Environmental Research*, 197, Article 110957. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110957>
- Rio, S., Faur-Brasquet, C., Le Coq, L., Lecomte, D., & Le Cloirec, P. (2004). Preparation and characterization of activated carbon from sewage sludge: carbonization step. *Water Science And Technology*, 49, 139-146. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0041>

## Referências Bibliográficas

- Rodríguez-Chueca, J., della Giustina, S., Rocha, J., Fernandes, T., Pablos, C., Encinas, A., & 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>
- Rodríguez-Iglesias, J., Alcalá, L., Megido, L., & Castrillón, L. (2022). Removal of fluoride from coke wastewater by aluminum doped chelating ion-exchange resins: a tertiary treatment. *Environmental Science And Pollution Research*, 29, 8705-8715. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16299-8>
- Royal Literary Fund. (2024). *What is a literature review?*. <https://www.rlf.org.uk/resources/what-is-a-literature-review/>
- Russo, T., Fucile, P., Giacometti, R., & Sannino, F. (2021). Sustainable Removal of Contaminants by Biopolymers: A Novel Approach for Wastewater Treatment. Current State and Future Perspectives. *PROCESSES*, 9, Article 719. <https://doi.org/10.3390/pr9040719>
- Saka, C., Sahin, Ö., & Küçük, M. (2012). Applications on agricultural and forest waste adsorbents for the removal of lead (II) from contaminated waters. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 9, 379-394. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0041-y>
- Saleem, J., Bin Shahid, U., Hijab, M., Mackey, H., McKay, G. (2019). Production and applications of activated carbons as adsorbents from olive stones. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00473-7>
- Sandi, Afriani, F., Tiandho, Y., & IOP. (2020, 2020-01-01). *Application of electrocoagulation for textile wastewater treatment: A review*. 2nd International Conference On Green Energy And Environment (ICoGEE 2020), Bangka Belitung, Indonesia. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/599/1/012069>
- Saner, A., Carvalho, P., Catalano, J., & Anastasakis, K. (2022). Renewable adsorbents from the solid residue of sewage sludge hydrothermal liquefaction for wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 838, Article 156418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156418>
- Sari-Erkan, H. (2019). Wastewater treatment from the biodiesel production using waste cooking oil by electrocoagulation: a multivariate approach. *Water Science And Technology*, 79, 2366-2377. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.238>
- Sciscenko, I., Mestre, S., Climent, J., Valero, F., Escudero-Oñate, C., Oller, I., & Arques, A. (2021). Magnetic Photocatalyst for Wastewater Tertiary Treatment at Pilot Plant Scale: Disinfection and Enrofloxacin Abatement. *Water*, 13, Article 329. <https://doi.org/10.3390/w13030329>
- Shan, T., Al Matar, M., Makky, E., & Ali, E. (2017). The use of *Moringa oleifera* seed as a natural coagulant for wastewater treatment and heavy metals removal. *Applied Water Science*, 7, 1369-1376. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0499-8>
- Shangguan, Y., Yu, S., Gong, C., Wang, Y., Yang, W., Hou, L., & IOP. (2018, 2018-01-01). *A Review of Microbubble and its Applications in Ozonation*. 3rd International Conference on Energy Equipment Science and Engineering (ICEESE 2017), Beijing, China. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/128/1/012149>
- Sheoran, K., Kaur, H., Siwal, S., Saini, A., Vo, D., & Thakur, V. (2022). Recent advances of carbon-based nanomaterials (CBNMs) for wastewater treatment: Synthesis and

- application. *Chemosphere*, 299, Article 134364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134364>
- Sher, F., Hanif, K., Iqbal, S., & Imran, M. (2020). Implications of advanced wastewater treatment: Electrocoagulation and electroflocculation of effluent discharged from a wastewater treatment plant. *Journal Of Water Process Engineering*, 33, Article 101101. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101101>
- Shirkoochi, M., Tyagi, R., Vanrolleghem, P., & Drogui, P. (2022). Artificial intelligence techniques in electrochemical processes for water and wastewater treatment: a review. *Journal Of Environmental Health Science And Engineering*, 20, 1089-1109. <https://doi.org/10.1007/s40201-022-00835-w>
- Shukla, S., Al Mushaiqri, N., Al Subhi, H., Yoo, K., & Al Sadeq, H. (2020). Low-cost activated carbon production from organic waste and its utilization for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 10, Article 62. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1145-z>
- Slipko, K., Reif, D., Schaar, H., Saracevic, E., Klinger, A., Wallmann, L., & Kreuzinger, N. (2022). Advanced wastewater treatment with ozonation and granular activated carbon filtration: Inactivation of antibiotic resistance targets in a long-term pilot study. *Journal Of Hazardous Materials*, 438, Article 129396. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129396>
- Smoczynski, L., Ratnaweera, H., Kosobucka, M., Smoczynski, M., Kalinowski, S., & Kvaal, K. (2016). Modelling the structure of sludge aggregates. *Environmental Technology*, 37, 1122-1132. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1102332>
- Sonawane, S., Fedorov, K., Rayaroth, M., & Boczkaj, G. (2022). Degradation of 1,4-dioxane by sono-activated persulfates for water and wastewater treatment applications. *Water Resources And Industry*, 28, Article 100183. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100183>
- Starling, M., Neto, R., Pires, G., Vilela, P., & Amorim, C. (2021). Combat of antimicrobial resistance in municipal wastewater treatment plant effluent via solar advanced oxidation processes: Achievements and perspectives. *Science Of The Total Environment*, 786, Article 147448. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147448>
- Sultana, S., Karmaker, B., Saifullah, A., Uddin, M., & Moniruzzaman, M. (2022). Environment-friendly clay coagulant aid for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 12, Article 6. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01540-z>
- Tahreen, A., Jami, M., & Ali, F. (2020). Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, Article 101440. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101440>
- Tang, S., Yan, D., & Lo, I. (2014). Sustainable Wastewater Treatment Using Microsized Magnetic Hydrogel with Magnetic Separation Technology. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 15718-15724. <https://doi.org/10.1021/ie502512h>
- Thomas, M., Zdebik, D., & Bialecka, B. (2018). Using Sodium Trithiocarbonate to Precipitate Heavy Metals from Industrial Wastewater - from the Laboratory to Industrial Scale. *Polish Journal Of Environmental Studies*, 27, 1753-1763. <https://doi.org/10.15244/pjoes/76408>

## Referências Bibliográficas

- Tien, T., & Luu, T. (2020). Electrooxidation of tannery wastewater with continuous flow system: Role of electrode materials. *Environmental Engineering Research*, 25, 324-334. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.349>
- Tony, M. (2020). Zeolite-based adsorbent from alum sludge residue for textile wastewater treatment. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 17, 2485-2498. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02646-8>
- Torres-Pinto, A., Díez, A., Silvaa, C., Fariaa, J., Sanromán, M., Silva, A., & Pazos, M. (2023). Photoelectrocatalytic degradation of pharmaceuticals promoted by a metal-free g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 476, Article 146761. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146761>
- Tran, N., Escribà-Gelonch, M., Sarafraz, M., Pho, Q., Sagadevan, S., & Hessel, V. (2023). Process Technology and Sustainability Assessment of Wastewater Treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62, 1195-1214. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03471>
- Tsilo, P., Basson, A., Ntombela, Z., Maliehe, T., & Pullabhotla, V. (2022). Production and Characterization of a Bioflocculant from *Pichia kudriavzevii* MH545928.1 and Its Application in Wastewater Treatment. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 19, Article 3148. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063148>
- Tsydenova, O., Batoev, V., & Batoeva, A. (2015). Solar-Enhanced Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Simultaneous Removal of Pathogens and Chemical Pollutants. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 12, 9542-9561. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809542>
- Turcanu, A., Matei, E., Râpa, M., Predescu, A., Coman, G., & Predescu, C. (2022). Biowaste Valorization Using Hydrothermal Carbonization for Potential Wastewater Treatment Applications. *Water*, 14, Article 2344. <https://doi.org/10.3390/w14152344>
- Uludag-Demirer, S., Olson, N., Ives, R., Nshimiyimana, J., Rusinek, C., Rose, J., & Liao, W. (2020). Techno-Economic Analysis of Electrocoagulation on Water Reclamation and Bacterial/Viral Indicator Reductions of a High-Strength Organic Wastewater-Anaerobic Digestion Effluent. *Sustainability*, 12, Article 2697. <https://doi.org/10.3390/su12072697>
- United Nations (2024, Junho 12). *Water and Sanitation*. <https://sdgs.un.org/topics/water-and-sanitation>
- Uysal, A., & Boyacioglu, E. (2021). Evaluation of the performance of titanium and zirconium salts as coagulants in industrial wastewater treatment: pollutant removal, sludge production, and sludge characteristics. *Applied Water Science*, 11, Article 78. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01409-1>
- Van Eck, N. e Waltman, L. (2023). *VOSviewer Manual*. (version 1 .6.20). Leiden University.
- Vigneshwaran, S., Karthikeyan, P., Sirajudheen, P., & Meenakshi, S. (2020). Optimization of sustainable chitosan/Moringa. oleifera as coagulant aid for the treatment of synthetic turbid water - A systemic study. *Environmental Chemistry And Ecotoxicology*, 2, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2020.08.002>

- Villaseñor-Basulto, D., Astudillo-Sánchez, P., del Real-Olvera, J., & Bandala, E. (2018). Wastewater treatment using *Moringa oleifera Lam* seeds: A review. *Journal Of Water Process Engineering*, 23, 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.017>
- Villegas-Guzman, P., Giannakis, S., Rtimi, S., Grandjean, D., Bensimon, M., de Alencastro, L., & Pulgarin, C. (2017). A green solar photo-Fenton process for the elimination of bacteria and micropollutants in municipal wastewater treatment using mineral iron and natural organic acids. *Applied Catalysis B-Environmental*, 219, 538-549. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.07.066>
- Wang, B., Yang, X., Ma, L., Zhai, L., Xuan, J., Liu, C., & Bai, Z. (2020). Ultra-high efficient pH induced selective removal of cationic and anionic dyes from complex coexisted solution by novel amphoteric biocomposite microspheres. *Separation And Purification Technology*, 231, Article 115922. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115922>
- Wang, G., Hambly, A., Dou, Y., Wang, G., Tang, K., & Andersen, H. (2022). Polishing micropollutants in municipal wastewater, using biogenic manganese oxides in a moving bed biofilm reactor (BioMn-MBBR). *Journal Of Hazardous Materials*, 427, Article 127889. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127889>
- Webster, C. (1962). The sewers of Mohenjo-Daro. *J. Water Pollution Control Fed.*, 34(2),116-123.
- Wei, K., Cui, T., Huang, F., Zhang, Y., & Han, W. (2020). Membrane Separation Coupled with Electrochemical Advanced Oxidation Processes for Organic Wastewater Treatment: A Short Review. *Membranes*, 10, Article 337. <https://doi.org/10.3390/membranes10110337>
- Wolf, C., Pavese, A., von Gunten, U., & Kohn, T. (2019). Proxies to monitor the inactivation of viruses by ozone in surface water and wastewater effluent. *Water Research*, 166, Article 115088. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115088>
- Wu, X., Zhang, J., Hu, S., Zhang, G., Lan, H., Peng, J., & Liu, H. (2022). Evaluation of degradation performance toward antiviral drug ribavirin using advanced oxidation process and its relations to ecotoxicity evolution. *Science Of The Total Environment*, 850, Article 157851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157851>
- Xu, B., Zhang, Y., Li, X., Yao, Y., Huang, X., Xia, S., & Dong, P. (2019). A simple preparation route for polysilicate titanium salt from spent titanium solutions. *Water Science And Technology*, 80, 1347-1356. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.383>
- Xu, J, Zheng, X., Feng, Z., Lu, Z., Zhang, Z., Huang, W., Li, Y., Vuckovic, D., Li, Y., Dai, S., Chen, G., Wang, K., Wang, H., Chen, J. K., Mitch, W., Cui, Y. (2021). Organic wastewater treatment by a single-atom catalyst and electrolytically produced H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Nature Sustainability*. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00635-w>
- Yang, D. & Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- Yang, Y., & Hoffmann, M. (2016). Synthesis and Stabilization of Blue-Black TiO<sub>2</sub> Nanotube Arrays for Electrochemical Oxidant Generation and Wastewater Treatment. *Environmental Science & Technology*, 50, 11888-11894. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03540>

## Referências Bibliográficas

- Yang, Y., Lin, L., Tse, L., Dong, H., Yu, S., & Hoffmann, M. (2019). Membrane-separated electrochemical latrine wastewater treatment. *Environmental Science-Water Research & Technology*, 5, 51-59. <https://doi.org/10.1039/c8ew00698a>
- Yao, J., Mei, Y., Jiang, J., Xia, G., & Chen, J. (2022). Process Optimization of Electrochemical Treatment of COD and Total Nitrogen Containing Wastewater. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 19, Article 850. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020850>
- Yao, J., Mei, Y., Xia, G., Lu, Y., Xu, D., Sun, N., & Chen, J. (2019). Process Optimization of Electrochemical Oxidation of Ammonia to Nitrogen for Actual Dyeing Wastewater Treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, Article 2931. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162931>
- Yaqoob, A. A., Parveen, T., Umar, K., Ibrahim, M. N. M. (2020). Role of Nanomaterials in the Treatment of Wastewater: A Review. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12020495>
- Yasipourtehrani, S., Strezov, V., Kan, T., & Evans, T. (2021). Investigation of Dye Removal Capability of Blast Furnace Slag in Wastewater Treatment. *Sustainability*, 13, Article 1970. <https://doi.org/10.3390/su13041970>
- Younas, F., Mustafa, A., Farooqi, Z., Wang, X., Younas, S., Mohy-Ud-Din, W., & Hussain, M. (2021). Current and Emerging Adsorbent Technologies for Wastewater Treatment: Trends, Limitations, and Environmental Implications. *water*, 13, Article 215. <https://doi.org/10.3390/w13020215>
- Yu, X., Tang, Y., Pan, J., Shen, L., Begum, A., Gong, Z., & Xue, J. (2020). Physico-chemical processes. *Water Environment Research*, 92, 1751-1769. <https://doi.org/10.1002/wer.1430>
- Yun, Y., Li, Z., Chen, Y., Saino, M., Cheng, S., & Zheng, L. (2018). Elimination of nitrate in secondary effluent of wastewater treatment plants by Fe<sup>0</sup> and Pd-Cu/diatomite. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8, 29-37. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.122>
- Zagklis, D., & Bampos, G. (2022). Tertiary Wastewater Treatment Technologies: A Review of Technical, Economic, and Life Cycle Aspects. *Processes*, 10, Article 2304. <https://doi.org/10.3390/pr10112304>
- Zaman, B. (2018, 2018-01-01). *Potential of Natural Flocculant in Coagulation-Flocculation Wastewater Treatment Process*. 3rd International Conference On Energy, Environmental And Information System (ICENIS 2018), Semarang, Indonesia. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187305006>
- Zhai, J., & Wang, Y. (2013, 2013-01-01). *Status and development of DDNP wastewater treatment*. 2013 International Symposium On Environmental Science And Technology (2013 Isest), Dalian, China. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.087>
- Zhang, K., Zhou, X., Du, P., Zhang, T., Cai, M., Sun, P., & Huang, C. (2017). Oxidation of  $\beta$ -lactam antibiotics by peracetic acid: Reaction kinetics, product and pathway evaluation. *Water Research*, 123, 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.057>

- Zhang, Y., Yang, Y., Yang, S., Quispe-Cardenas, E., & Hoffmann, M. (2021). Application of Heterojunction Ni-Sb-SnO<sub>2</sub> Anodes for Electrochemical Water Treatment. *Acs Es&T Engineering*, 1, 1236-1245. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.1c00122>
- Zheng, T., Wang, J., Wang, Q., Meng, H., & Wang, L. (2017). Research trends in electrochemical technology for water and wastewater treatment. *Applied Water Science*, 7, 13-30. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0280-4>
- Zheng, Y., Wang, B., Wester, A., Chen, J., He, F., Chen, H., & Gao, B. (2019). Reclaiming phosphorus from secondary treated municipal wastewater with engineered biochar. *Chemical Engineering Journal*, 362, 460-468. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.036>
- Zhong, J., Yang, B., Gao, F., Xiong, Q., Feng, Y., Li, Y., & Ying, G. (2021). Performance and mechanism in degradation of typical antibiotics and antibiotic resistance genes by magnetic resin-mediated UV-Fenton process. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 227, Article 112908. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112908>
- Ziembowicz, S., & Kida, M. (2022). Limitations and future directions of application of the Fenton-like process in micropollutants degradation in water and wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, 296, Article 134041. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134041>
- Zou, R., Angelidaki, I., Jin, B., & Zhang, Y. (2020). Feasibility and applicability of the scaling-up of bio-electro-Fenton system for textile wastewater treatment. *Environment International*, 134, Article 105352. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105352>
- Zueva, S., Ferella, F., Taglieri, G., De Michelis, I., Pugacheva, I., & Vegliò, F. (2020). Zero-Liquid Discharge Treatment of Wastewater from a Fertilizer Factory. *Sustainability*, 12, Article 397. <https://doi.org/10.3390/su12010397>
- Zungu, V., Hadebe, L., Mpungose, P., Hamza, I., Amaku, J., & Gumbi, B. (2022). Fabrication of Biochar Materials from Biowaste Coffee Grounds and Assessment of Its Adsorbent Efficiency for Remediation of Water-Soluble Pharmaceuticals. *Sustainability*, 14, Article 2931. <https://doi.org/10.3390/su14052931>

## Referências Bibliográficas

## ANEXOS

**Instituto Nacional de Estatística**

Quadro “Estações de tratamento de águas residuais (N.º) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual”, extraído do sítio do Instituto Nacional de Estatística, separador Produtos, Dados Estatísticos: Base de Dados. Opção Navegação em Árvore, pastas Ambiente, Água, Águas Residuais

Quadro extraído em 05 de maio de 2023 (17:06:25)  
<http://www.ine.pt>

| Localização geográfica (NUTS - 2013) (1) |    | Estações de tratamento de águas residuais (N.º) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual (3) |  |
|--|----|--|--|
|  |    | Período de referência dos dados (2)  |  |
|  |    | 2020   |  |
|  |    | Níveis de tratamento das águas residuais   |  |
|  |    | Total  |  |
|  |    | N.º  |  |
| <b>Portugal</b>                          | PT | 2873   |  |
| <b>Continente</b>                        | 1  | 2832   |  |
| <b>Região Autónoma dos Açores</b>        | 2  | 19   |  |
| <b>Região Autónoma da Madeira</b>        | 3  | 22   |  |

Estações de tratamento de águas residuais (N.º) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual - INE, ERSAR, ERSARA, DREM, Sistemas públicos urbanos de serviços de águas / vertente física e de funcionamento

*Nota(s):*

(1) A partir de 1 de janeiro de 2015 entrou em vigor uma nova versão das NUTS (NUTS 2013). Ao nível da NUTS II ocorreu apenas uma alteração de designação em "Lisboa" que passou a ser designada por "Área Metropolitana de Lisboa".

(2) Os valores de 2016 são provisórios.

(3) 2011: inclui dados de entidades gestoras em alta e em baixa. O INE procedeu a estimativas nos casos em que não foram reportados e/ou desagregados dados por municípios. <br> Metodologia: nas situações de ausência de resposta, foi contemplada a repartição do total de ETAR por EG, utilizando como aproximação um rácio de número de ETAR por município sobre o número de ETAR total por EG. Posteriormente multiplicou-se os valores de rácio, por município, pelo valor total de ETAR por EG. As ETAR com valor repartido foram consideradas na classe de Tratamento Instalado como "Não Especificado".

Última atualização destes dados: 19 de setembro de 2022

Quadro com “Águas residuais drenadas (Série 2011) ( m<sup>3</sup>) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Origem das águas residuais (Sector); Anual”, “Águas residuais drenadas por habitante (Série 2011) ( m<sup>3</sup>/ hab.) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual”, “Águas residuais tratadas em estações de tratamento de águas residuais (m<sup>3</sup>) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual”, “Proporção de alojamentos servidos por drenagem de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual” e “Proporção de alojamentos servidos por tratamento de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual” compilado da informação extraída do sítio do Instituto Nacional de Estatística em separador Produtos, Dados Estatísticos: Base de Dados. Opção Estatísticas territoriais, Unidade Territorial Continente e Região Autónoma da Madeira, Seleção de indicadores: Ambiente

Quadro extraído em 06 de maio de 2023  
(11:23:10)  
<http://www.ine.pt>

| Localização geográfica (NUTS - 2013) (1) | Período de referência dos dados (2) | Águas residuais drenadas (Série 2011) (m <sup>3</sup> ) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Origem das águas residuais (Sector); Anual (3) |           | Águas residuais drenadas por habitante (Série 2011) (m <sup>3</sup> / hab.) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual |      | Águas residuais tratadas em estações de tratamento de águas residuais (m <sup>3</sup> ) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual |          | Proporção de alojamentos servidos por drenagem de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual (4) |   | Proporção de alojamentos servidos por tratamento de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual |   |
|--|-------------------------------------|---|-----------|---|------|--|----------|---|---|---|---|
|  |                                     | Origem das águas residuais (Sector)   |           |   |      | Níveis de tratamento das águas residuais   |          |   |   |   |   |
|  |                                     | Total   |           |   |      | Total  |          |   |   |   |   |
|  |                                     | m <sup>3</sup>  |           | m <sup>3</sup> / hab.   |      | m <sup>3</sup>   |          | %   |   | %   |   |
| Continente                               | 1                                   | 2020  | 670649763 | “   | 68,5 | “  | x        | 85  | “ | 84  | “ |
| Região Autónoma da Madeira               | 3                                   | 2020  | 13413000  |   | 52,8 |  | 13402000 | 67,9  |   | 66,9  |   |

Águas residuais drenadas (Série 2011) (m<sup>3</sup>) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Origem das águas residuais (Sector); Anual - INE, ERSAR, ERSARA, DREM, Sistemas públicos urbanos de serviços de águas / vertente física e de funcionamento

Águas residuais drenadas por habitante (Série 2011) (m<sup>3</sup>/ hab.) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual - INE, ERSAR, ERSARA, DREM, Sistemas públicos urbanos de serviços de águas / vertente física e de funcionamento

Águas residuais tratadas em estações de tratamento de águas residuais (m<sup>3</sup>) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual - INE, ERSAR, ERSARA, DREM, Sistemas públicos urbanos de serviços de águas / vertente física e de funcionamento

## Anexos

Proporção de alojamentos servidos por drenagem de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual - INE, ERSAR, ERSARA, DREM, Sistemas públicos urbanos de serviços de águas / vertente física e de funcionamento

Proporção de alojamentos servidos por tratamento de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual - INE, ERSAR, ERSARA, DREM, Sistemas públicos urbanos de serviços de águas / vertente física e de funcionamento

*Nota(s):*

*(1) A partir de 1 de janeiro de 2015 entrou em vigor uma nova versão das NUTS (NUTS 2013). Ao nível da NUTS II ocorreu apenas uma alteração de designação em "Lisboa" que passou a ser designada por "Área Metropolitana de Lisboa".*

*(2) Os valores de 2016 são provisórios.*

*(3) Inclui dados de entidades gestoras em alta e em baixa. O INE procedeu a estimativas nos casos em que não foram reportados e/ou desagregados dados por municípios. <br>Metodologia: nas situações de ausência de resposta, realizou-se imputação de valores de água residual drenada, utilizando como base os valores de água distribuída. De seguida, foi contemplada a repartição do valor de águas residuais drenadas, por origem, por EG, utilizando como aproximação um rácio do total de água distribuída por EG sobre o total de água distribuída no ano em questão. Posteriormente multiplicou-se o valor do rácio pelos valores de águas residuais drenadas.*

*(4) As estimativas efetuadas pelo INE tiveram por base a informação dos municípios reportada pela ERSAR.*

Última atualização destes dados: 04 de novembro de 2022

*PopulationPyramid.net*

Lista de países ordenados pelo tamanho da população: Ano 2024

|    | <b>País</b>     | <b>População</b> |
|----|-----------------|------------------|
| 1  | Índia           | 1,450,935,791    |
| 2  | China           | 1,419,321,278    |
| 3  | Estados Unidos  | 345,426,571      |
| 4  | Indonésia       | 283,487,931      |
| 5  | Paquistão       | 251,269,164      |
| 6  | Nigéria         | 232,679,478      |
| 7  | Brasil          | 211,998,574      |
| 8  | Bangladesh      | 173,562,364      |
| 9  | Rússia          | 144,820,423      |
| 10 | Etiópia         | 132,059,768      |
| 11 | México          | 130,861,007      |
| 12 | Japão           | 123,753,041      |
| 13 | Egito           | 116,538,258      |
| 14 | Filipinas       | 115,843,670      |
| 15 | RD Congo        | 109,276,265      |
| 16 | Vietname        | 100,987,687      |
| 17 | Irão            | 91,567,738       |
| 18 | Turquia         | 87,473,805       |
| 19 | Alemanha        | 84,552,242       |
| 20 | Tailândia       | 71,668,011       |
| 21 | Reino Unido     | 69,138,192       |
| 22 | Tanzânia        | 68,560,157       |
| 23 | França          | 66,548,531       |
| 24 | África do Sul   | 64,007,187       |
| 25 | Itália          | 59,342,867       |
| 26 | Quênia          | 56,432,945       |
| 27 | Myanmar         | 54,500,091       |
| 28 | Colômbia        | 52,886,364       |
| 29 | Coreia do Sul   | 51,717,590       |
| 30 | Sudão           | 50,448,963       |
| 31 | Uganda          | 50,015,093       |
| 32 | Espanha         | 47,910,527       |
| 33 | Argélia         | 46,814,308       |
| 34 | Iraque          | 46,042,015       |
| 35 | Argentina       | 45,696,159       |
| 36 | Afganistão      | 42,647,492       |
| 37 | Iémen           | 40,583,165       |
| 38 | Canadá          | 39,742,430       |
| 39 | Polónia         | 38,539,201       |
| 40 | Marrocos        | 38,081,173       |
| 41 | Angola          | 37,885,850       |
| 42 | Ucrânia         | 37,860,222       |
| 43 | Uzbequistão     | 36,361,859       |
| 44 | Malásia         | 35,557,674       |
| 45 | Moçambique      | 34,631,766       |
| 46 | Gana            | 34,427,414       |
| 47 | Peru            | 34,217,848       |
| 48 | Arábia Saudita  | 33,962,757       |
| 49 | Madagáscar      | 31,964,956       |
| 50 | Costa do Marfim | 31,934,230       |

*Publicação submetida durante a elaboração da dissertação*



### DECLARATION

The Journal of Lifestyle and SDGs Review, registered under ISSN 2965-730x and indexed in Scopus, is pleased to announce the publication of the manuscript titled “Tratamento de Águas Residuais: Uma Visão Geral da Pesquisa Através da Análise Bibliométrica” authored by Paula Liliana de Sousa de Sá, Sérgio António Neves Lousada, Hugo Luís Santos Teixeira, This manuscript is included in Vol. 5 No. 2.

In line with our principles of transparency and academic rigor, we affirm the accuracy of this statement.

For more information about the journal, please visit:

<https://sdgsreview.org/LifestyleJournal/issue/view/143>

DOI: <https://doi.org/10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n02.pe03641>

Florida, November 26<sup>th</sup>, 2024



QR code for publication validity



## TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS: UMA VISÃO GERAL DA PESQUISA ATRAVÉS DA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Paula Liliana de Sousa de Sá <sup>1</sup>  
Sérgio António Neves Lousada <sup>2</sup>  
Hugo Luís Santos Teixeira <sup>3</sup>

### ABSTRACT

**Objetivo:** Apresentar o estado atual da pesquisa sobre o tratamento de águas residuais e dos tratamentos por cloração e ultravioleta, destinados à reutilização.

**Enquadramento teórico:** Foi realizada uma análise bibliométrica, baseada em indicadores quantitativos e qualitativos da amostra. Em seguida, foi realizada uma revisão da literatura, na forma de uma visão geral da literatura dos principais artigos.

**Metodologia:** A recolha de dados para a análise bibliométrica ocorreu em junho de 2024, utilizando a Web of Science. Aplicando diversos critérios, foram obtidas as amostras finais sobre o tema tratamento de águas residuais e sobre os temas adicionais do tratamento por cloração e ultravioleta.

**Resultados e Discussão:** Análise da evolução anual, bem como dos países e instituições de origem, das principais revistas e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável onde se incluem os documentos sobre o tema principal de tratamento de águas residuais. Foi também realizada uma análise adicional sobre o tema da cloração e tratamento ultravioleta para reutilização. A revisão da literatura, focou-se nos temas de absorção, eletrocoagulação, floculação e hidrodecloração, em relação ao tratamento de águas residuais, e nos temas adicionais de cloração e tratamento ultravioleta.

**Implicações da pesquisa:** Os autores estudados recomendam o desenvolvimento de estudos sobre as reais implicações das tecnologias atuais e das inovações, bem como a necessidade de ultrapassar os estudos da escala de laboratório para a escala real.

**Originalidade/Valor:** Os artigos estudados são apresentados enquadrados nos tópicos da base de dados, resumindo-os, de forma narrativa e identificando as suas características principais, permitindo que futuros investigadores obtenham uma visão global do trabalho publicado.

**Palavras-chave:** águas residuais, análise bibliométrica, desinfecção da água, drenagem, tratamento de águas residuais, visão geral da literatura, Sustainable Development Goals (SDGs).

**Received:** Aug/23/2024

**Accepted:** Oct/25/2024

**DOI:** <https://doi.org/10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n02.pe03641>



<sup>1</sup> Universidade da Madeira (UMa), Funchal, Madeira, Portugal.

E-mail: plilianasa.eng@gmail.com

<sup>2</sup> Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia (FCEE), Departamento de Engenharia Civil e Geologia (DECG), Universidade da Madeira (UMa), Funchal, Portugal. Centro de Investigação para a Valorização de Recursos Endógenos (VALORIZA), Portalegre, Portugal. Grupo de Investigação em Ambiente e Ordenamento do Território (MAOT), Universidad de Extremadura; Badajoz, Espanha. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (RISCO), Aveiro, Portugal. Centro de Investigação (CITUR), Desenvolvimento e Inovação em Turismo, Madeira, Portugal. E-mail: slousada@staff.uma.pt

<sup>3</sup> Universidade Aberta, Lisboa, Portugal. E-mail: hlsttec@gmail.com



## 1 INTRODUÇÃO

A história do tratamento de águas residuais inicia-se nos primeiros anos do século XX com a instalação das primeiras Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), (Marecos do Monte et al., 2016). No entanto e apesar de não serem consideradas infraestruturas essenciais ao crescimento dos meios urbanos, existem registos de obras de drenagem de águas residuais com mais de 5 000 anos, (Matos, 2003).

Na viragem do século XIX para XX já eram habituais os tratamentos de águas residuais por aplicação no solo e irrigação agrícola, filtração e precipitação química. Em Paris, desde o século XIX que o efluente é encaminhado para tratamento do solo em Archères, cujas melhorias nas instalações permitem atualmente tratamento por lamas ativadas e tratamento físico-químico. (Matos, 2003).

Sendo o tratamento de águas residuais reconhecido como uma necessidade premente, durante o século XX, começaram a instalar-se ETAR nos sistemas existentes.

Os dados publicados pelos Instituto Nacional de Estatística em 2020 registam 2 832 ETAR em Portugal Continental, 19 na Região Autónoma da Madeira (RAM) e 22 na Região Autónoma dos Açores, estando 84% e 66,9% dos alojamentos servidos por tratamento de águas residuais em Portugal Continental e na RAM, respetivamente.

Na RAM existem atualmente 2 municípios que dispõem de ETAR com tratamento terciário, designadamente a ETAR de Gaula no Município de Santa Cruz e a ETAR da Ponta no Município do Porto Santo.

O objetivo deste artigo é a análise quantitativa e qualitativa da pesquisa global sobre o tratamento de águas residuais, de forma a definir o estado da arte sobre a pesquisa desenvolvida, a nível mundial, na área em estudo. Para tal, será analisado o período de 1950 a 2024, nas variáveis quantitativas evolução, principais países, principais instituições e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e na variável qualitativa principais publicações, para o tratamento de águas residuais e as variáveis quantitativas evolução e países para os tratamentos por cloração e ultravioleta.



## 2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

O presente trabalho recorre à bibliometria, “técnica quantitativa e estatística de medição dos índices de produção e disseminação do conhecimento científico” para uma “avaliação objetiva da produção científica”, (Araújo, 2006, p. 12).

O cerne de uma análise bibliométrica é simplesmente contar, (Pendlebury, 2008). Este estudo inicia-se com a recolha de dados, que posteriormente serão analisados. Todo este procedimento será apresentado de forma clara e detalhada, de forma a ser útil para o conhecimento do estado atual da pesquisa no tratamento de água residuais. “Esta transparência vai ajudar a assegurar o seu uso apropriado.”, (Pendlebury, 2008, tradução própria).

A base de dados escolhida foi a *Web of Science*, por indexar milhares de periódicos, com melhor cobertura nas áreas científicas, comparativamente à *Scopus*, composta por informação desde 1900 até hodiernamente, para algumas revistas, com atualização semanal, (Costa et al., 2012).

Posteriormente, será efetuada uma revisão da literatura. De entre os 14 tipos identificados por Grant & Booth (2009), o presente trabalho enquadra-se melhor numa *overview* ou visão geral, como o próprio título indica. (Grant & Booth, 2009) descrevem uma visão geral como um resumo da literatura existente, relatando as suas características. O tipo e qualidade da pesquisa e a sua sistematização serão bem explanados, sendo que se procedeu a um resumo, que terá a forma narrativa, e será organizado e analisado conforme os tópicos *Citation Topics Micro*, disponibilizados na base de dados *Web of Science*.

Os mesmos autores identificam como ponto forte de uma revisão do tipo visão geral o benefício que os interessados em conhecer o tema terão ao aceder a um resumo amplo e abrangente que permitirá se enquadrar e desenvolver as suas próprias verificações e investigações. Como desvantagem, os autores referem a possível falta de métodos sistemáticos e relatórios detalhados, lacuna que se pretendeu colmatar com a exposição detalhada da pesquisa.



### 3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho acedemos à *Core Collection* ou Coleção Principal, em português, da *Web of Science*. Pesquisamos na opção Tópico, os termos “wastewater treatment” e dado o hiato temporal considerado decorrer entre os anos de 1950 até o ano corrente, adicionou-se à pesquisa o parâmetro Ano de publicação 1950-2024, obtendo-se 91 466 documentos.

Para cumprir o objetivo proposto com este trabalho interessa analisar as publicações de investigações, pelo que se excluiu o material editorial e correções, obtendo-se 90 178 registos, que serão a amostra da análise bibliométrica. O filtro Categorias da *Web of Science*, identifica mais de 15 000 documentos nas categorias de Ciências Ambientais, Engenharia Ambiental, Recursos Hídricos e Engenharia Química, detendo todas as outras menos de 7 500 documentos cada. Assim, refinou-se a pesquisa apenas para estas categorias principais, ficando com 60 196 documentos. Utilizando o filtro Tópicos de Citação Meso, o tópico com mais documentos que parece enquadrar-se melhor na presente análise, Tratamento da Água, reduz a amostra para 11 137 documentos, dos tipos Artigo, Artigo de revisão, Artigo de conferência e Acesso antecipado. Aplicando o filtro Relevância limitamos a amostra aos 2 000 documentos mais relevantes, dos quais 428 estão em acesso aberto, característica essencial à análise. Considerando os artigos que detêm 5 ou mais citações, obtemos a amostra final de 272 documentos.

Para a amostra adicional dos tratamentos destinados à reutilização, aplicou-se o filtro com o termo “chlorination”, tendo-se obtido 742 resultados e os termos “UV” OR “Ultraviolet”, obtendo 5 742 resultados.

Aplicando a mesma metodologia da amostra inicial reduzimos a amostra adicional a 24 e 178 documentos sobre o tema cloração e ultravioleta, respetivamente.

Conforme referido no ponto anterior, procede-se posteriormente à visão geral da literatura. Refere-se que da amostra de 272 documentos sobre o tema tratamento de águas residuais, apesar de se ter aplicado o filtro Acesso Aberto, permaneceram 15 documentos a que não foi possível aceder devido às instituições dos autores não terem protocolo com as editoras e 1 documento foi



objeto de retratação da publicação, pelo que foi excluído. Assim, o resumo incide sobre 256 documentos, enquadrando-se 226 documentos no tratamento de águas residuais e 30 nos tratamentos por cloração e ultravioleta, destinados à reutilização.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

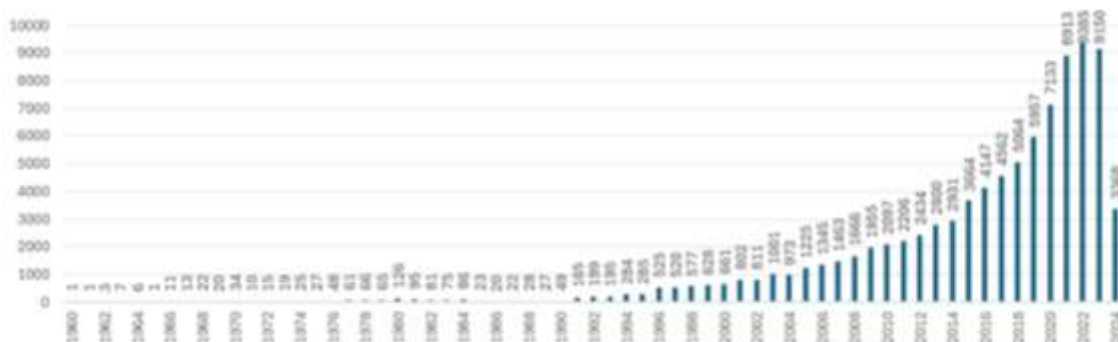
#### 4.1.1 Evolução anual das publicações

Apesar do período em análise se iniciar em 1950, com a exclusão de material não relevante para a investigação, o primeiro documento sobre tratamento de águas residuais, foi publicado em 1960, tendo-se verificado um desenvolvimento gradual até 1980, período em que supera uma centena de documentos publicados. Entre 1981 e 1990 observa-se uma redução para números inferiores à centena, sendo que a partir de 1991, observa-se um crescimento expressivo, ultrapassando em 2003 o milhar de publicações.

Apesar de no ano seguinte, em 2004, ter-se reduzido para 973 documentos, a partir deste ano verifica-se um crescimento acentuado, com incremento anual de centenas de registos, até atingir o seu máximo em 2023 com 9 150 publicações.

**Figure 1**

*Publicações por ano*





O gráfico regista uma quebra acentuada em 2024 para 3 368 publicações, devido à pesquisa conter apenas as publicações registadas até junho de 2024.

Assim, verificamos que tem havido um aumento do interesse da comunidade no tratamento de águas residuais, uma vez que entre 1960 até 2003 publicou-se 7 740 documentos, correspondente a 8,6%, sendo que a partir de 2004 registam-se 82 438 documentos, relativos a 91,4% das publicações.

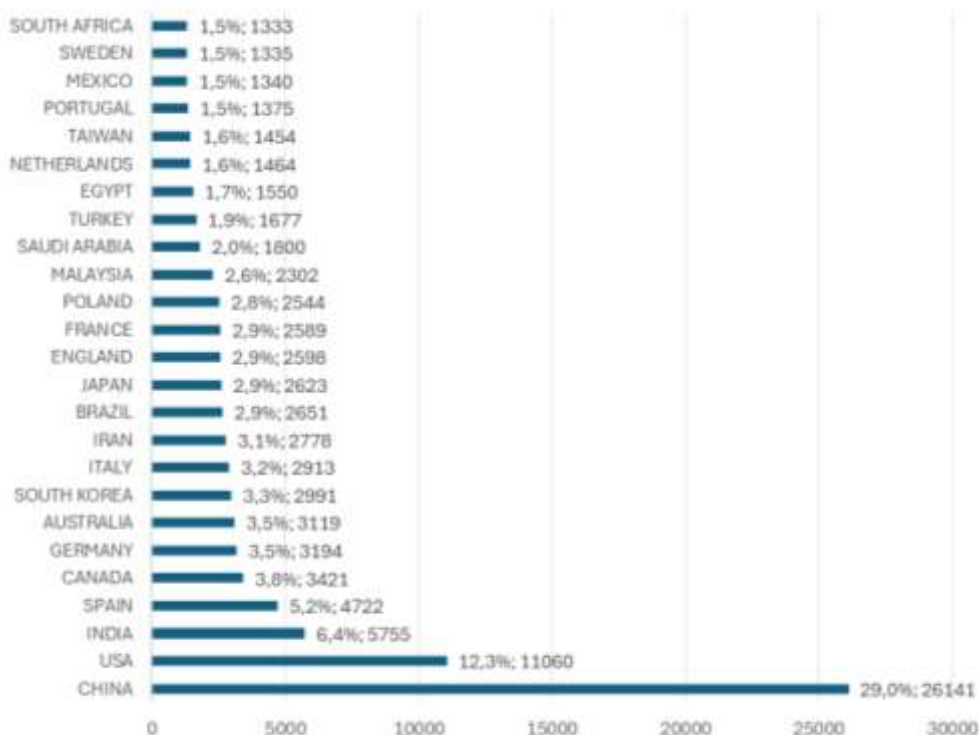
#### 4.1.2 Países das publicações

As publicações sobre tratamento de águas residuais estão identificadas na *Web of Science* como oriundas de 182 países, distribuindo-se pelos 5 continentes.

Na Figura 2 apresentamos as percentagens e número de documentos dos 25 países com mais publicações. O país mais produtivo foi a China com 26 141 documentos, 29% do total, seguida dos Estados Unidos da América com 11 060 documentos, correspondente a 12,3%, da Índia com 5 755 documentos, 6,4% das publicações e da Espanha com 4 722 documentos, 5,2% do total.

Figure 2

25 países com mais publicações





### 4.1.3 Principais instituições

As instituições que colaboraram nos documentos representam um vasto número, superior a 27 000. Assim, elaborou-se o gráfico constante na Figura 3, onde podemos observar as 26 instituições com mais de 500 publicações, responsáveis por 25% das publicações.

A instituição presente em mais artigos é a *Chinese Academy of Sciences*, da China, com 2 924 artigos, 3,24% do total, seguida do *Egyptian Knowledge Bank EKB*, do Egito, com 1 503 documentos correspondentes a 1,67% da amostra e da *Harbin Institute of Technology*, também da China, com 1 443 registos que equivalem a 1,6%.

Figure 3

Principais instituições



Estas principais instituições estão distribuídas por 12 países, dos 5 continentes. Assim, originárias de 11 instituições da China vêm 11 093 documentos, 12,3% das publicações, seguida de temos 3 instituições da Índia, identificadas em 2,9 % dos documentos e da França estão presentes duas instituições com 1,9% das publicações.





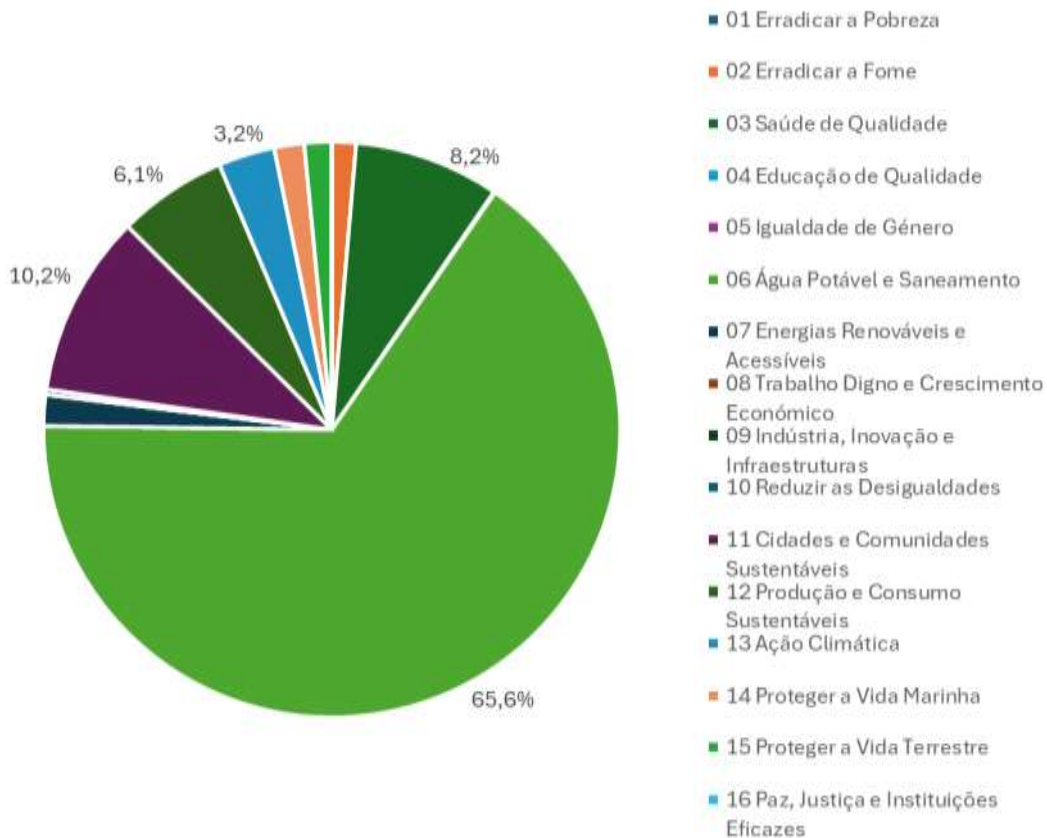
#### 4.1.4 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável são objetivos globais assumidos pelos 193 países das Nações Unidas, em 2015, através da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e definem “prioridades e aspirações do desenvolvimento sustentável global para 2030”. (Business Council for Sustainable Development (BCSD) Portugal, 2024).

A *Web of Science* identifica em que objetivo se inclui os documentos da base de dados e apesar de 10,5% dos documentos em estudo ainda não possuem esta referência, pareceu relevante analisar em que objetivos se enquadram os documentos sobre o tratamento de águas residuais, representados na Figura 4.

**Figure 4**

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Verificamos que 65,6% dos documentos são indicados no objetivo 06, Água Potável e Saneamento, seguido do objetivo 11, Cidades e Comunidades Sustentáveis com 10,2% e do objetivo 03, Saúde de Qualidade, com 8,2%. Todos





os demais objetivos possuem referências inferiores, não estando o objetivo 17, Parcerias para a Implementação dos Objetivos identificado em nenhum documento.

O objetivo identificado em maior número de documentos, 06 Água Potável e Saneamento, pretende “Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos.” (tradução de United Nations, 2024). Na sua descrição, podemos ler que a água e o saneamento são o cerne do desenvolvimento sustentável, apesar de nas últimas décadas “a sobreexploração, a poluição e as alterações climáticas levaram a um grave stress hídrico em diversos locais do mundo.” (tradução de United Nations, 2024).

Atualmente 2,2 milhões de pessoas não têm acesso à gestão segura da água potável e mais de 4,2 milhões não têm acesso à gestão segura do saneamento. As alterações climáticas com cada vez maior ocorrência de inundações e secas, agravam ainda mais a situação. 80% das águas residuais retornam ao ecossistema sem tratamento ou reutilização e perdeu-se 70% das zonas húmidas mundiais, (United Nations, 2024).

É então essencial alterar a gestão de recursos hídricos e o fornecimento de água potável e saneamento a milhares de milhões de pessoas em todo o mundo. Para superar esta crise global que afeta todos os países, social, económica e ambientalmente é necessária uma ação urgente, (United Nations, 2024).

Considerando a elevada percentagem de documentos relacionados com este objetivo sustentável, é incontestável o interesse da comunidade académica na investigação sobre o tema do tratamento de águas residuais.

#### 4.1.5 Principais Revistas

A revista com mais publicações é a *Water Science and Technology*, com 4 398 artigos, seguida da *Water Research*, com 3 355 artigos, ambas oriundas da Inglaterra, e da *Science of The Total Environment*, com 3 235 provenientes dos Países Baixos.

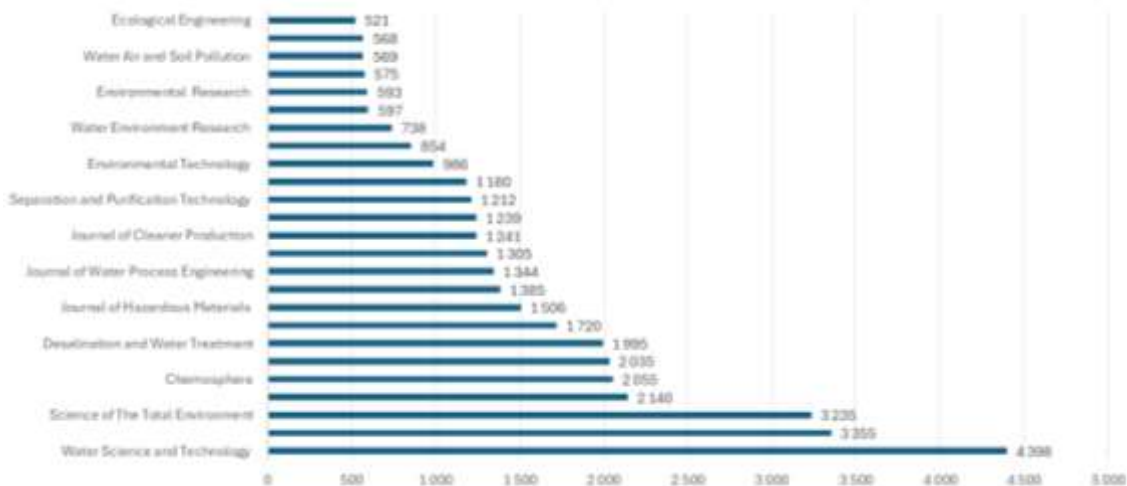
Além dos países suprarreferidos, denotam-se evidências de principais



publicações com origem na Suíça, Itália, Alemanha e Estados Unidos da América.

**Figure 5**

*Principais revistas*



#### 4.1.6 Evolução anual publicações sobre tratamento por cloração e ultravioleta

Apesar do período de pesquisa se centrar entre os anos de 1950 e 2024, o primeiro documento com o tópico cloração foi publicado em 1968, tendo ultrapassado a dezena de publicações em 2004, tendo vindo a subir gradualmente até 2022 onde obteve o máximo de 63 publicações. Até junho de 2024, ocorrem 21 registos, quantia que previsivelmente aumentará até final deste ano.

No tópico do tratamento por ultravioleta, o primeiro documento foi publicado em 1975, ultrapassando uma dezena em 1996, apresentando algumas flutuações até 2003, após o que aumenta sucessivamente até o seu máximo de 2023, com 707 documentos. Em 2024, regista 303 publicações, apesar de, como já referido, se prever o aumento deste número até o final do ano.

Verificamos que, embora as publicações sobre o tópico tratamento por ultravioleta terem se iniciado posteriormente ao tratamento por cloração, e ambas se manterem reduzidas até 1995, a partir de 1996, os números começam a distanciar-se, sendo que em 2010 o ultravioleta ultrapassa a centena, com

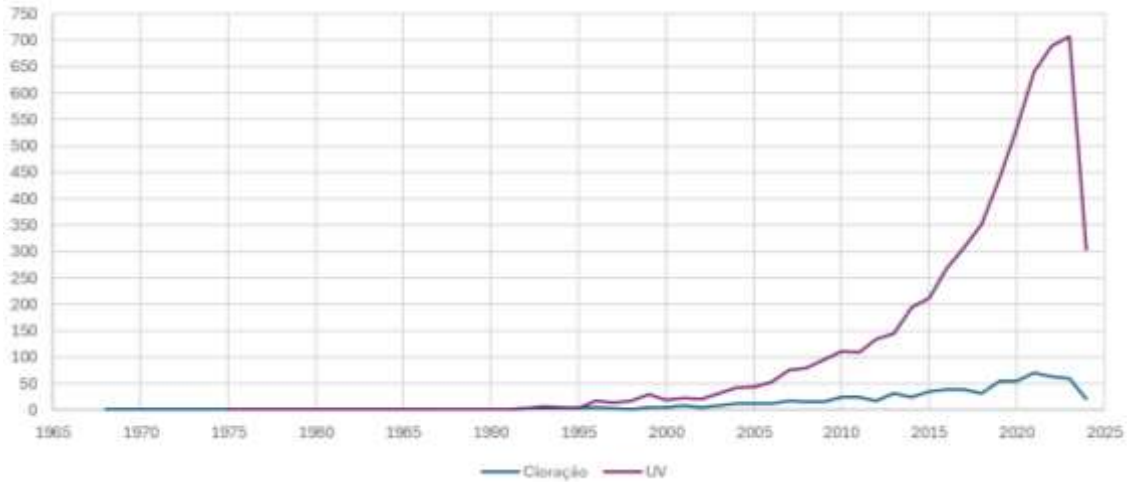




112 documentos mantendo-se a tendência até ao ano de 2023.

**Figure 6**

*Publicações por ano*



Assim, é explícito o incremento de interesse da comunidade investigadora uma vez que até 2010 se publicaram 174 documentos sobre o tema cloração, correspondendo a 23,61% do total, tendo-se publicado posteriormente 563 documentos, relativos aos restantes 76,39%.

Sobre o tema do tratamento por ultravioleta, publicaram-se até 2010, 697 documentos, 12,18% do total, e posteriormente 5 027 publicações, correspondendo a 87,82% da amostra.

Observamos ainda que os 737 documentos sobre tratamento por cloração e os 5 724 sobre o tratamento por ultravioleta equivalem a 0,82% e 6,35% respetivamente, da pesquisa sobre tratamento de águas residuais.

#### 4.1.7 Principais países com publicações sobre tratamento por cloração e ultravioleta

Comparando os 10 países com mais publicações, verificamos na Figura 7 a sua distribuição.

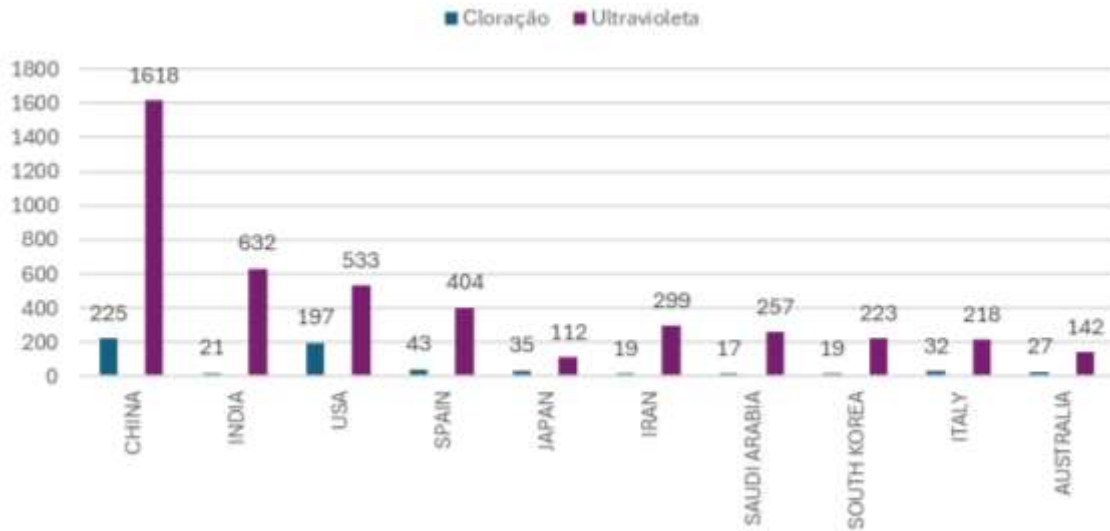
Assim, observamos que em ambos os casos, assim como sobre o tratamento de águas residuais, o país mais produtivo é a China. A Índia, apesar de ser o segundo país com mais publicações sobre o tratamento por ultravioleta,



está na 10.<sup>a</sup> posição relativamente às publicações com o tópico cloração. Os Estados Unidos da América e a Espanha têm posições consecutivas em ambos os tópicos, sendo que o Japão, apesar de ser o 4.<sup>o</sup> país com mais publicações sobre cloração, está na posição 18.<sup>o</sup> no tratamento sobre ultravioleta.

**Figure 7**

*Países com mais publicações*



Notamos que apesar de ocuparem posições diferentes no número de publicações, estão sempre nos lugares cimeiros, pelo que os principais países a trabalhar sobre os tópicos do tratamento de águas residuais destinada à reutilização, por cloração e por ultravioleta, são os mesmos.

## 4.2 VISÃO GERAL DA LITERATURA

### 4.2.1 Absorção

A absorção de contaminantes em águas residuais revela que o carbono ativado, tradicionalmente utilizado é eficaz, mas caro, havendo necessidade de encontrar alternativas mais económicas e eficientes para a remoção de poluentes, especialmente metais pesados, (Crini et al., 2019), (Chen et al., 2020), (Thomas et al., 2018).

Em estudo está a utilização da nanotecnologia, com materiais como





nanotubos de carbono, (Aslam et al., 2021), nanocompósitos de argila, (Ayalew, 2022) e óxidos metálicos, (Mateus et al., 2021), (Ghosh et al., 2022), (Gutierrez et al., 2017), que apresentam grande potencial adsorvente. Os biofloculantes naturais tais como diversos resíduos de biomassa, (Kasera et al., 2022), (S. Li et al., 2019), como cascas de frutas, (Diaz De Tuesta et al., 2022), (Saka et al., 2012), madeira e outros materiais agrícolas, (Hagemann et al., 2020), têm sido investigados como adsorventes, tanto isoladamente quanto em combinação com outros compostos, além dos biofloculantes minerais tais como zeólitas, (De-La-Vega et al., 2018), bentonitas, (El Bastamy et al., 2021), argilas, (Maged et al., 2023) e outros materiais inorgânicos, (Khan et al., 2022), também demonstram boa capacidade de absorção e dos materiais à base de grafeno e carbono, (Ali et al., 2019) que apresentam alta eficiência na remoção de contaminantes.

Na reutilização de resíduos, os estudos exploram a transformação de biossólidos, (Chiang et al., 2003), lamas de estações de tratamento de água, (Cho & Suzuki, 1980), pós de tijolo, (Maslon & Czarnota, 2020) e outros resíduos industriais, (Yasipourtehrani et al., 2021) em adsorventes.

#### 4.2.2 Eletrocoagulação

A eletrocoagulação mostra-se uma técnica promissora para tratar diversos tipos de águas residuais, removendo uma ampla gama de contaminantes como corantes, matéria orgânica, turbidez, (Ebba et al., 2021), fósforo, (Uludag-Demirer et al., 2020) e até mesmo microplásticos, (Elkhatib et al., 2021), sendo eficiente em diversos tipos de efluentes industriais tais como têxtil, (Bilińska & Gmurek, 2021), alimentar, (Meiramkulova et al., 2020), (Cristóvão et al., 2015) e hospitalar, (Cano et al., 2020), (De Witte et al., 2010).

Combinada com outras técnicas, tais como os processos de oxidação avançada, (Deng & Zhao, 2015), aumenta significativamente a eficiência na remoção de contaminantes mais complexos e resistentes, sendo que a otimização dos parâmetros operacionais é fundamental para maximizar a eficiência da eletrocoagulação, (Tahreen et al., 2020).

A eletrocoagulação também pode ser aplicada no tratamento de águas



residuais geradas em processos de reutilização de resíduos, como o tratamento de efluentes de produção de biodiesel a partir de óleo de cozinha usado, (Sari-Erkan, 2019).

#### 4.2.3 Floculação

A utilização de coagulantes tradicionais à base de alumínio gera preocupações ambientais devido à produção de resíduos e lamas não biodegradáveis, (Kurniawan et al., 2020). A procura por alternativas mais sustentáveis e eficientes para o tratamento de águas residuais é constante.

Os coagulantes naturais, tais como sementes de Moringa, (Abiyu et al., 2018), quitosano, (Vigneshwaran et al., 2020), taninos, (Lugo et al., 2020), extratos de plantas, (Kristianto et al., 2019), (Chua et al., 2019), (Chua et al., 2020) e outros materiais naturais, (Sultana et al., 2022) têm demonstrado grande potencial como coagulantes. Os biofloculantes tais como polímeros extracelulares microbianos, (Ajao et al., 2018), biofloculantes produzidos por bactérias, (Agunbiade et al., 2016), (Gupta et al., 2023), leveduras, (Tsiló et al., 2022), e plantas, (Makhtar et al., 2020), além de produtos de origem vegetal como a goma de *Guar*, (Mukherjee et al., 2013) e a fécula de mandioca, (Zaman, 2018), são alternativas promissoras.

Materiais como lama vermelha, (Kyrii et al., 2020), cinzas volantes, (L. Li et al., 2009) e sais de titânio, (Xu et al., 2019) têm sido investigados como coagulantes, promovendo a valorização de resíduos industriais.

#### 4.2.4 Hidrodecloração

A hidrodecloração versa sobre a viabilidade de utilização de pastilhas de (ferro zero valente) ZVI para a dessalinização da água, (Antia, 2022), remoção de cromo hexavalente, (Hamdan et al., 2023), nanopartículas de ZVI para tratamento de efluentes de uma pequena ETAR, (Oprčkal et al., 2017), um novo catalisador combinado com ZVI para remoção de nitrato, (Yun et al., 2018) e partículas de ferro “verde” produzidas a partir de extrato de folhas de uva para a remoção de corantes têxteis reativos, (Raman et al., 2021).



#### 4.2.5 Cloração

No tópico da cloração verificou-se que o aumento da utilização de cloro, durante a pandemia do COVID-19 intensificou a formação de subprodutos de desinfecção (DBP), (Peng et al., 2021). Investigou-se o impacto do cloreto na degradação de um desses subprodutos, (Huang et al., 2017) e verificou-se que a cloração foi mais eficaz para a inativação de bactérias, quando comparada com a combinação de UV com persulfato e ferro, mais eficaz para remover pesticidas, (Miralles-cuevas et al., 2021).

#### 4.2.6 Ultravioleta

No tratamento por ultravioleta (UV) verifica-se que o cloro e seus derivados aumentam a presença de subprodutos da desinfecção (DBP) enquanto o uso de ácido peracético e UV os elimina, sendo essencial escolher as tecnologias de desinfecção que minimizem a formação de DBP, principalmente quando se almeja reutilizar a água, (Albolafio et al., 2022).

Os processos de oxidação avançada com utilização de UV/peróxido de hidrogénio são mais comuns, no entanto, surge a combinação UV/cloro mais eficiente e económica, necessitando de mais estudos sobre a formação de DBP, (Farzanehsa et al., 2023). A combinação de peróxido de hidrogénio com UV/cloro é mais eficaz para remover antibióticos, enquanto UV/Cloro isolada é mais eficaz na remoção de genes de resistência, (Rodríguez-Chueca et al., 2019).

### 5 CONCLUSÃO

A análise bibliométrica comprovou o crescente aumento do interesse da comunidade académica no tratamento de águas residuais, uma vez que até 2003 publicaram-se 8,6% dos documentos, registando-se os restantes 91,4% após este ano. Verificou-se que 29% das publicações são oriundas das China e a instituição com mais publicações é a Chinese Academy of Sciences, da China, sendo a revista mais escolhida para publicar a *Water Science and Technology*.



A maioria dos documentos são referenciados ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 06 Água Potável e Saneamento, sendo incontestável o interesse da comunidade acadêmica na investigação sobre o tema do tratamento de águas residuais e a necessidade de intervenção urgente para melhorar e providenciar as populações de sistemas adequados de distribuição de água e de saneamento de águas residuais.

Da amostra sobre o tema do tratamento de águas residuais, 0,82% correspondem ao tema cloração e 6,35% ao tema do tratamento por ultravioleta, sendo a China e os Estados Unidos primeiros nas publicações sobre cloração e a China e a Índia no tratamento por UV.

Na área da absorção, a pesquisa procura identificar materiais alternativos ao carbono ativado para a remoção de contaminantes em águas residuais, com foco em materiais de baixo custo e alta eficiência. A utilização de resíduos agrícolas e industriais como adsorventes representa uma abordagem promissora, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.

A eletrocoagulação apresenta-se como uma tecnologia versátil e eficiente para o tratamento de águas residuais, com potencial de otimização e combinação com outras técnicas para atender às exigências de um tratamento cada vez mais rigoroso e sustentável. A reutilização de resíduos e a procura por soluções mais ecológicas são tendências promissoras nesse campo.

A pesquisa na área de floculação concentra-se no desenvolvimento de coagulantes naturais e biofloculantes como alternativas mais sustentáveis aos coagulantes tradicionais. Esses materiais apresentam um grande potencial para a melhoria dos processos de tratamento de águas residuais, contribuindo para a proteção do meio ambiente e a promoção da economia circular.

Na hidrocloração, o ferro zero valente emerge como uma tecnologia promissora para o tratamento de água, oferecendo soluções inovadoras e sustentáveis para diversos desafios relacionados à qualidade da água. As pesquisas apresentadas demonstram a versatilidade do ZVI e do seu potencial para revolucionar o setor de tratamento de água.

O uso do cloro para desinfecção da água é uma prática comum, mas a formação de DBP é um desafio a superar. A procura por alternativas e a



otimização dos processos de desinfecção são essenciais para garantir a qualidade da água e a saúde pública.

A desinfecção por UV, combinada com outros oxidantes, oferece uma alternativa mais segura e eficiente à cloração tradicional, reduzindo a formação de subprodutos prejudiciais à saúde. No entanto, é preciso continuar a pesquisa desenvolvendo novas tecnologias para garantir a qualidade da água e a proteção da saúde pública.

Como desenvolvimentos futuros identificamos a análise dos métodos de tratamento mais adequados a cada tipo de contaminante, principalmente para os efluentes industriais, o estudo do impacto socioeconómico através dos benefícios para a saúde pública, promoção da economia circular e desafios para a implementação destas tecnologias em escala real e a análise do ciclo de vida dos materiais, considerando os seus impactos ambientais, desde a produção até à deposição final.



## REFERÊNCIAS

- Abiyu, A., Yan, D., Girma, A., Song, X., & Wang, H. (2018). Wastewater treatment potential of *Moringa stenopetala* over *Moringa olifera* as a natural coagulant, antimicrobial agent and heavy metal removals. *Cogent Environmental Science*, 4(1). <https://doi.org/10.1080/23311843.2018.1433507>
- Agunbiade, M. O., Pohl, C. H., & Ashafa, A. O. T. (2016). A review of the application of bioflocualnts in wastewater treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(4), 1381-1389. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61063>
- Ajao, V., Bruning, H., Rijnaarts, H., & Temmink, H. (2018). Natural flocculants from fresh and saline wastewater: Comparative properties and flocculation performances. *Chemical Engineering Journal*, 349, 622-632. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.123>
- Albolafio, S., Marín, A., Allende, A., García, F., Simón-Andreu, P. J., Soler, M. A., & Gil, M. I. (2022). Strategies for mitigating chlorinated disinfection byproducts in wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132583>
- Ali, I., Basheer, A. A., Mbianda, X. Y., Burakov, A., Galunin, E., Burakova, I., Mkrtchyan, E., Tkachev, A., & Grachev, V. (2019). Graphene based adsorbents for remediation of noxious pollutants from wastewater. *Environment International*, 127, 160-180. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.029>
- Antia, D. (2022). Purification of Saline Water Using Desalination Pellets. *Water*, 14(17), 2639. <https://doi.org/10.3390/w14172639>
- Araújo, C. A. (2006). *Bibliometria: Evolução histórica e questões atuais* (Vol. 12, Número 1, pp. 11-32).
- Aslam, M. M. A., Kuo, H. W., Den, W., Usman, M., Sultan, M., & Ashraf, H. (2021). Functionalized carbon nanotubes (Cnts) for water and wastewater treatment: Preparation to application. *Sustainability (Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/su13105717>
- Ayalew, A. A. (2022). A critical review on clay-based nanocomposite particles for application of wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 85(10), 3002-3022. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.150>
- Bilińska, L., & Gmurek, M. (2021). Novel trends in AOPs for textile wastewater treatment. Enhanced dye by-products removal by catalytic and synergistic actions. *Water Resources and Industry*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100160>
- Business Council for Sustainable Development (BCSD) Portugal. (2024, Junho 12). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. <https://ods.pt/ods/>



- Cano, P. A., Jaramillo-Baquero, M., Zúñiga-Benítez, H., Londoño, Y. A., & Peñuela, G. A. (2020). Use of simulated sunlight radiation and hydrogen peroxide in azithromycin removal from aqueous solutions: Optimization & mineralization analysis. *Emerging Contaminants*, 6, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.12.004>
- Chen, B., Chen, Y., Xu, L., Zhang, Y., & Li, H. (2020). Research and development on industrial heavy metal wastewater treatment technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 585(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/585/1/012051>
- Chiang, H. L., Choa, C. G., Chen, S. Y., & Tsai, M. C. (2003). The reuse of biosludge as an adsorbent from a petrochemical wastewater treatment plant. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 53(9), 1042-1051. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466259>
- Cho, B. R., & Suzuki, M. (1980). Activated Carbon by Pyrolysis of Sludge From Pulp-Mill Wastewater-Treatment. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 13, 463-467. <https://doi.org/10.1252/jcej.13.463>
- Chua, S. C., Malek, M. A., Chong, F. K., Sujarwo, W., & Ho, Y. C. (2019). Red lentil (*Lens culinaris*) extract as a novel natural coagulant for turbidity reduction: An evaluation, characterization and performance optimization study. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081686>
- Chua, S. C., Show, P. L., Chong, F. K., & Ho, Y. C. (2020). Lentil waste as novel natural coagulant for agricultural wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 82(9), 1833-1847. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.409>
- Costa, T., Lopes, S., Fernández-Llimós, F., Amante, M. J., & Lopes, P. F. (2012). *A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: Indicadores e ferramentas*. Congresso Nacional de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas.
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D., & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195-213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>
- Cristóvão, R. O., Gonçalves, C., Botelho, C. M., Martins, R. J. E., Loureiro, J. M., & Boaventura, R. A. R. (2015). Fish canning wastewater treatment by activated sludge: Application of factorial design optimization. Biological treatment by activated sludge of fish canning wastewater. *Water Resources and Industry*, 10, 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2015.03.001>
- De Witte, B., Van Langenhove, H., Demeestere, K., Saerens, K., De Wispelaere, P., & Dewulf, J. (2010). Ciprofloxacin ozonation in hospital wastewater treatment plant effluent: Effect of pH and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Chemosphere*, 78(9), 1142-1147. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.026>
- De-La-Vega, D. P., González, C., Escalante, C. A., Gallego, J., Salamanca, M.,



- & Manrique-Losada, L. (2018). Use of faujasite-type zeolite for ion adsorption in municipal wastewater. *Tecnologia y Ciencias del Agua*, 9(4). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-08>
- 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>
- Diaz De Tuesta, J. L., Roman, F. F., Marques, V. C., Silva, A. S., Silva, A. P. F., Bosco, T. C., Shinibekova, A. A., Aknur, S., Kalmakhanova, M. S., Massalimova, B. K., Arrobas, M., Silva, A. M. T., & Gomes, H. T. (2022). Performance and modeling of Ni(II) adsorption from low concentrated wastewater on carbon microspheres prepared from tangerine peels by FeCl<sub>3</sub>-assisted hydrothermal carbonization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108143>
- Ebba, M., Asaithambi, P., & Alemayehu, E. (2021). Investigation on operating parameters and cost using an electrocoagulation process for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 11(11). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01517-y>
- El Bastamy, E., Ibrahim, L. A., Ghandour, A., Zelenakova, M., Vranayova, Z., & Abu-Hashim, M. (2021). Efficiency of natural clay mineral adsorbent filtration systems in wastewater treatment for potential irrigation purposes. *Sustainability (Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/su13105738>
- Elkhatib, D., Oyanedel-Craver, V., & Carissimi, E. (2021). Electrocoagulation applied for the removal of microplastics from wastewater treatment facilities. *Separation and Purification Technology*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118877>
- Farzanehsa, M., Vaughan, L. C., Zamyadi, A., & Khan, S. J. (2023). Comparison of UV-Cl and UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation processes in the degradation of contaminants from water and wastewater: A review. *Water and Environment Journal*, 37(4), 633-643. <https://doi.org/10.1111/wej.12868>
- Ghosh, N., Das, S., Biswas, G., & Haldar, P. K. (2022). Review on some metal oxide nanoparticles as effective adsorbent in wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 85(12), 3370-3395. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.153>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91-108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Gupta, A., Kumar, M., Sharma, R., Tripathi, R., Kumar, V., & Thakur, I. S. (2023). Screening and characterization of bioflocculant isolated from thermotolerant *Bacillus* sp. ISTVK1 and its application in wastewater treatment. *Environmental Technology and Innovation*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103135>



- Gutierrez, A. M., Dziubla, T. D., & Hilt, J. Z. (2017). Recent advances on iron oxide magnetic nanoparticles as sorbents of organic pollutants in water and wastewater treatment. *Reviews on Environmental Health*, 32(1-2), 111-117. <https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0063>
- Hagemann, N., Schmidt, H. P., Kägi, R., Böhrer, M., Sigmund, G., Maccagnan, A., McArdell, C. S., & Bucheli, T. D. (2020). Wood-based activated biochar to eliminate organic micropollutants from biologically treated wastewater. *Science of the Total Environment*, 730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138417>
- Hamdan, M. A., Sublaban, E. T., Al-Asfar, J. J., & Banisaid, M. A. (2023). Wastewater Treatment Using Activated Carbon Produced from Oil Shale. *Journal of Ecological Engineering*, 24(2), 131-139. <https://doi.org/10.12911/22998993/156664>
- Huang, Y., Wang, Z., Liu, Q., Wang, X., Yuan, Z., & Liu, J. (2017). Effects of chloride on PMS-based pollutant degradation: A substantial discrepancy between dyes and their common decomposition intermediate (phthalic acid). *Chemosphere*, 187, 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.120>
- Instituto Nacional de Estatística (2023). Estações de tratamento de águas residuais (N.º) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual. [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_indicadores&indOcorrCod=0009607&xlang=pt&contexto=bd&selTab=tab2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0009607&xlang=pt&contexto=bd&selTab=tab2)
- Instituto Nacional de Estatística (2023). Águas residuais drenadas (Série 2011) (m<sup>3</sup>) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Origem das águas residuais (Sector); Anual. Águas residuais drenadas por habitante (Série 2011) (m<sup>3</sup>/hab.) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual. Águas residuais tratadas em estações de tratamento de águas residuais (m<sup>3</sup>) por Localização geográfica (NUTS - 2013) e Níveis de tratamento das águas residuais; Anual. Proporção de alojamentos servidos por drenagem de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual. Proporção de alojamentos servidos por tratamento de águas residuais (%) por Localização geográfica (NUTS - 2013); Anual. [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_unid\\_territorial&menuBOUI=13707095&contexto=ut&selTab=tab3](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_unid_territorial&menuBOUI=13707095&contexto=ut&selTab=tab3)
- Kasera, N., Kolar, P., & Hall, S. G. (2022). Nitrogen-doped biochars as adsorbents for mitigation of heavy metals and organics from water: A review. *Biochar*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00145-2>
- Khan, M., Ali, S. W., Shahadat, M., & Sagadevan, S. (2022). Applications of polyaniline-impregnated silica gel-based nanocomposites in wastewater treatment as an efficient adsorbent of some important organic dyes. *Green Processing and Synthesis*, 11(1), 617-630. <https://doi.org/10.1515/gps-2022-0063>



- Kristianto, H., Rahman, H., Prasetyo, S., & Sugih, A. K. (2019). Removal of Congo red aqueous solution using *Leucaena leucocephala* seed's extract as natural coagulant. *Applied Water Science*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0972-2>
- Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Said, N. S. M., Ismail, N. 'Izzati, Hasan, H. A., Othman, A. R., & Purwanti, I. F. (2020). Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 1-33. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>
- Kyrii, S., Dontsova, T., Kosogina, I., Astrelin, I., Klymenko, N., & Nechyporuk, D. (2020). Local wastewater treatment by effective coagulants based on wastes. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), 34-41. <https://doi.org/10.12911/22998993/122184>
- Li, L., Fan, M., Brown, R. C., Koziel, J. A., & van Leeuwen, J. (Hans). (2009). Production of a new wastewater treatment coagulant from fly ash with concomitant flue gas scrubbing. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), 1430-1437. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.035>
- Li, S., Yao, Y., Zhao, T., Wang, M., & Wu, F. (2019). Biochars preparation from waste sludge and composts under different carbonization conditions and their Pb(II) adsorption behaviors. *Water Science and Technology*, 80(6), 1063-1075. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.353>
- Lugo, L., Martín, A., Diaz, J., Pérez-Flórez, A., & Celis, C. (2020). Implementation of modified acacia tannin by mannich reaction for removal of heavy metals (Cu, Cr and Hg). *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020352>
- Maged, A., El-Fattah, H. A., Kamel, R. M., Kharbish, S., & Elgarahy, A. M. (2023). A comprehensive review on sustainable clay-based geopolymers for wastewater treatment: Circular economy and future outlook. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11303-9>
- Makhtar, N. S. M., Idris, J., Musa, M., Andou, Y., Hamid, K. H. K., & Puasa, S. W. (2020). Plant-based *Tacca leontopetaloides* biopolymer flocculant (TBPF) produced high removal of turbidity, TSS, and color for leachate treatment. *Processes*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/PR8050527>
- Marecos do Monte, H., Santos, M. T., Barreiros, A. M., & Albuquerque, A. (2016). *Tratamento de Águas Residuais: Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico*. [www.ersar.pt](http://www.ersar.pt)
- Maslon, A., & Czarnota, J. (2020). Efficiency of brick dust and powdered ceramsite in the phosphorus removal from wastewater. *Journal of Ecological Engineering*, 21(2), 63-71. <https://doi.org/10.12911/22998993/116346>



- Mateus, A., Torres, J., Marimon-Bolivar, W., & Pulgarín, L. (2021). Implementation of magnetic bentonite in food industry wastewater treatment for reuse in agricultural irrigation. *Water Resources and Industry*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100154>
- Matos, J. de S. (2003). *Aspectos Históricos a Actuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano*.
- Meiramkulova, K., Jakupova, Z., Orynbekov, D., Tashenov, E., Kydyrbekova, A., Mkilima, T., & Inglezakis, V. J. (2020). Evaluation of electrochemical methods for poultry slaughterhouse wastewater treatment. *Sustainability (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/su12125110>
- Miralles-cuevas, S., De la Odra, I., Gualda-alonso, E., Soriano-molina, P., Casas López, J. L., & Sánchez Pérez, J. A. (2021). Simultaneous disinfection and organic microcontaminant removal by uvc-led-driven advanced oxidation processes. *Water (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/w13111507>
- Mukherjee, S., Pariatamby, A., Sahu, J. N., & Sen Gupta, B. (2013). Clarification of rubber mill wastewater by a plant based biopolymer - comparison with common inorganic coagulants. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(10), 1864-1873. <https://doi.org/10.1002/jctb.4041>
- Oprčkal, P., Mladenovič, A., Vidmar, J., Mauko Pranjić, A., Milačić, R., & Ščančar, J. (2017). Critical evaluation of the use of different nanoscale zero-valent iron particles for the treatment of effluent water from a small biological wastewater treatment plant. *Chemical Engineering Journal*, 321, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.104>
- Pendlebury, D. (2008). *White Paper Using bibliometrics in evaluating Research*. Thomson Reuters.
- Peng, L., Wang, F., Zhang, D., Fang, C., van der Hoek, J. P., & Chu, W. (2021). Effect of oxidation ditch and anaerobic-anoxic-oxic processes on CX3R-type disinfection by-product formation during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145344>
- Raman, C. D., Sellappa, K., & Mkandawire, M. (2021). Facile one step green synthesis of iron nanoparticles using grape leaves extract: Textile dye decolorization and wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 83(9), 2242-2258. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.140>
- 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>



- Saka, C., Şahin, Ö., & Küçük, M. M. (2012). Applications on agricultural and forest waste adsorbents for the removal of lead (II) from contaminated waters. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9(2), 379-394. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0041-y>
- Sari-Erkan, H. (2019). Wastewater treatment from the biodiesel production using waste cooking oil by electrocoagulation: A multivariate approach. *Water Science and Technology*, 79(12), 2366-2377. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.238>
- Sultana, S., Karmaker, B., Saifullah, A. S. M., Galal Uddin, M., & Moniruzzaman, M. (2022). Environment-friendly clay coagulant aid for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 12(1). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01540-z>
- Tahreen, A., Jami, M. S., & Ali, F. (2020). Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101440>
- Thomas, M., Zdebik, D., & Białecka, B. (2018). Using sodium trithiocarbonate to precipitate heavy metals from industrial wastewater - from the laboratory to industrial scale. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(4), 1753-1763. <https://doi.org/10.15244/pjoes/76408>
- Tsilo, P. H., Basson, A. K., Ntombela, Z. G., Maliehe, T. S., & Pullabhotla, V. S. R. R. (2022). Production and Characterization of a Biofloculant from *Pichia kudriavzevii* MH545928.1 and Its Application in Wastewater Treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph19063148>
- Uludag-Demirer, S., Olson, N., Ives, R., Nshimiyimana, J. P., Rusinek, C. A., Rose, J. B., & Liao, W. (2020). Techno-economic analysis of electrocoagulation on water reclamation and bacterial/viral indicator reductions of a high-strength organic wastewater-anaerobic digestion effluent. *Sustainability (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/su12072697>
- United Nations (2024, Junho 12). *Water and Sanitation*. <https://sdgs.un.org/topics/water-and-sanitation>
- Vigneshwaran, S., Karthikeyan, P., Sirajudheen, P., & Meenakshi, S. (2020). Optimization of sustainable chitosan/Moringa. Oleifera as coagulant aid for the treatment of synthetic turbid water - A systemic study. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.08.002>
- Xu, B., Zhang, Y., Li, X., Yao, Y., Huang, X., Xia, S., & Dong, P. (2019). A simple preparation route for polysilicate titanium salt from spent titanium solutions. *Water Science and Technology*, 80(7), 1347-1356. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.383>



- Yasipourtehrani, S., Strezov, V., Kan, T., & Evans, T. (2021). Investigation of dye removal capability of blast furnace slag in wastewater treatment. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su13041970>
- Yun, Y., Li, Z., Chen, Y. H., Saino, M., Cheng, S., & Zheng, L. (2018). Elimination of nitrate in secondary effluent of wastewater treatment plants by Fe0 and pd-cu/diatomite. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(1), 29-37. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.122>
- Zaman, B. (2018). *Potential of Natural Flocculant in Coagulation-Flocculation Wastewater Treatment Process*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2018730>