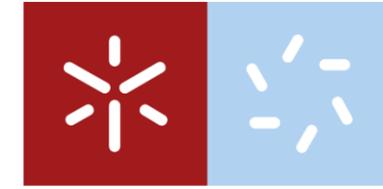




Reaproveitamento de águas residuais tratadas em contexto de economia circular

Marta Alexandra Pinheiro

UMINHO | 2022



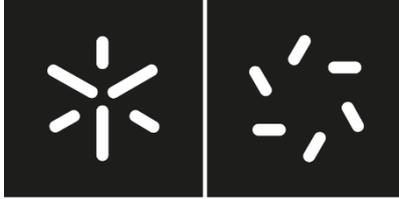
**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Marta Alexandra Pinheiro

Reaproveitamento de águas residuais tratadas em contexto de economia circular

outubro de 2022





**Universidade do Minho**

Escola de Ciências

Marta Alexandra Pinheiro

**Reaproveitamento de águas residuais tratadas  
em contexto de economia circular**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente

Ramo - Monitorização

Trabalho realizado sob orientação da

**Professora Doutora Teresa Valente**

e da

**Doutora Patrícia Gomes**

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



**Atribuição**  
**CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Agradecimentos

A elaboração da presente tese não seria possível sem o apoio de inúmeras pessoas e entidades a quem gostaria de agradecer todo o apoio neste percurso, em especial:

Às orientadoras, Doutora Fátima Patrícia da Silva Soares Gomes, e à Prof.<sup>a</sup> Doutora Teresa Maria Fernandes Valente, pelo apoio, orientação e disponibilidade demonstrada.

À empresa PhytoClean pela oportunidade de realização do estágio no âmbito da presente dissertação e pelo conhecimento partilhado, o qual fez crescer em mim um gosto especial por este tema.

Ao Instituto de Ciências da Terra (ICT), Polo da Universidade do Minho, financiado pela União Europeia através do Fundo de Desenvolvimento Regional, enquadrado no Programa COMPETE 2020 (projetos ICT-UIDB/04683/2020, UIDP/04683/2020) e do projeto Nano-MINENV 029259 (PTDC/CTA-AMB/29259/2017). Agradeço pelas condições disponibilizadas para a elaboração da presente dissertação.

À Doutora Lúcia Guise pelo auxílio, paciência e boa disposição no laboratório.

Aos meus amigos e colegas de mestrado, à Mafalda que fez este percurso ao meu lado, pelo apoio e momentos partilhados cheios de gargalhadas. À minha irmã de coração Teresa, que esteve presente sempre que precisei, pelo carinho e força que me deu.

À minha avó que sempre me ajudou com palavras carinhosas e força para continuar a lutar.

À minha família por me apoiarem não só nesta etapa, mas em toda a formação ao longo da minha vida, à qual sou eternamente grata.

Termino com um especial obrigado ao meu melhor amigo, confidente e companheiro de vida por todo o amor, paciência e carinho incondicional. Por sempre me incentivar a seguir atrás dos meus sonhos e nunca desistir. Obrigada por me escolheres para viver esta aventura que é a vida ao teu lado.

### **Declaração de integridade**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## Resumo

Episódios de seca cada vez mais frequentes e intensos acelerados por mudanças climáticas incrementam o problema da escassez de água. A gestão dos recursos hídricos representa assim, em contexto de mudanças climáticas, uma importância considerável. Neste cenário surge, portanto, a necessidade da sua reutilização, através da aplicação de práticas de tratamento sustentáveis e economicamente mais viáveis. A fitoremediação é uma opção cada vez mais estudada. Desta forma, o presente trabalho enquadra-se no âmbito da dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente da Universidade do Minho, realizada em contexto de estágio na Spin-off PhytoClean, e que teve como objetivo avaliar a possibilidade da reutilização para rega, de água residual doméstica tratada em contexto de fito-ETAR num Ecocanil. Contudo, é necessário o cumprimento de requisitos mínimos da qualidade da água para o seu respetivo uso, estando estas normas presentes na atual legislação Europeia e Nacional. Assim, este trabalho demonstra as várias etapas de investigação, incluindo aspetos relacionados com a recolha de amostras de água e a medição/avaliação de parâmetros físicos e químicos *in situ* e analisados em laboratório.

Os resultados demonstraram que os parâmetros medidos *in situ* cumprem os padrões de qualidade. No que diz respeito às taxas de remoção, estas apresentam uma boa percentagem para a carência química de oxigénio, sólidos suspensos totais e turbidez, com taxas máximas acima dos 97%. Os aniões e elementos potencialmente tóxicos apresentaram valores muito reduzidos, encontrando-se dentro das normas para a reutilização da água para rega, com exceção para o amónio, que não obteve conformidade em nenhuma das campanhas. O SAR (razão de adsorção de sódio) com um valor inferior a 2, apresentou-se inferior ao valor máximo recomendado (VMR), de 8.

O trabalho efetuado vem, assim, fomentar os princípios base da economia circular, enquadrados nas mais recentes diretrizes para o reaproveitamento de água, e indo de encontro aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, mais especificamente ao objetivo número seis “Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos”.

**Palavras-chave:** economia circular; escassez de água; águas residuais; fitorremediação; zonas húmidas artificiais.

## Abstract

Increasingly frequent and intense drought episodes accelerated by climate change add to the problem of water scarcity. The management of water resources thus represents, in the context of climate change, a considerable importance. In this scenario, therefore, the need for its reuse arises, through the application of sustainable and economically feasible treatment practices. Phytoremediation is an option increasingly studied. In this way, the present work is framed within the scope of the Master's thesis in Environmental Sciences and Technologies of the University of Minho, carried out as an internship at the Spin-off PhytoClean, with the purpose of assessing the possibility of reusing domestic wastewater treated in a phyto-ETAR context for irrigation in a eco kennel. However, it is necessary to meet minimum water quality requirements for its respective use, and these standards are present in current European and National legislation. Thus, this work demonstrates the various research steps, including aspects related to water sampling and measurement/assessment of physical and chemical parameters in situ and analyzed in laboratory.

The results showed that the parameters measured in situ meet the quality standards. With regard to removal rates, these show a good percentage for chemical oxygen demand, total suspended solids and turbidity, with maximum rates above 97%. The anions and potentially toxic elements showed very low values, being within the standards for the reuse of water for irrigation, except for ammonium, which did not comply in any of the campaigns. The SAR (sodium adsorption ratio), with a value of less than 2, was below the maximum recommended value (VMR) of 8.

The work carried out thus promotes the basic principles of the circular economy, framed in the most recent guidelines for water reuse, and meeting the United Nations Sustainable Development Goals, more specifically to goal number six "Ensure availability and sustainable management of drinking water and sanitation for all".

**Keywords:** circular economy; water scarcity; wastewater; phytoremediation; artificial wetlands.

## Índice Geral

Agradecimentos.....	III
Declaração de integridade .....	IV
Resumo .....	V
Abstract .....	VI
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do tema e objetivos.....	2
1.2. Estrutura da dissertação .....	3
<b>2. Zonas Húmidas .....</b>	<b>4</b>
2.1. Zonas Húmidas Naturais.....	4
2.1.1. Fitorremediação.....	6
2.1.2. Técnicas de Fitorremediação.....	6
2.2. Zonas Húmidas Artificiais para o tratamento de águas residuais .....	9
2.2.1. Caracterização das Fito-ETAR .....	9
2.2.2. Funcionamento das Fito-ETAR e processos de remoção de poluentes .....	10
2.2.3. Classificação dos leitos de macrófitas.....	16
2.2.4. Manutenção das plantas .....	18
2.3. Vantagens e desvantagens das zonas húmidas artificiais (ZHA).....	19
2.4. Enquadramento legal para reutilização da água .....	21
<b>3. Descrição do local de estudo .....</b>	<b>25</b>
3.1. Espécies utilizadas .....	27
3.2. Contexto climático.....	33
<b>4. Materiais e métodos .....</b>	<b>38</b>
4.1. Definição do plano de monitorização.....	38
4.2. Trabalho de campo .....	39
4.3. Trabalho laboratorial.....	41
4.4. Estágio na PhytoClean .....	48
<b>5. Resultados e discussão .....</b>	<b>52</b>
5.1. Propriedades hidroquímicas – conformidade legal .....	52
5.2. Eficiência da Fito-ETAR – Taxas de remoção.....	63
5.3. Avaliação da Qualidade da Água.....	64
<b>6. Conclusões .....</b>	<b>67</b>

7. Bibliografia..... 69

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Estrutura para avaliação das funções, bens e serviços do ecossistema (Adaptado de Groot et al., 2002).....	5
Figura 2.2 - Representação esquemática de técnicas de fitorremediação (Adaptado de Pilon-Smits, 2005).....	7
Figura 2.3 - Classificação geral das ZHA (Adaptado de Wallace e Knight, 2006).....	10
Figura 2.4 - Processos e mecanismos mais relevantes em sistemas de escoamento sub-superficial (Mendes, 2010).....	12
Figura 2.5 - Representação dos diferentes tipos de escoamento e o seu respetivo fluxo. (a) escoamento superficial; (b) escoamento sub-superficial com fluxo horizontal (translação); (c) escoamento sub-superficial com fluxo vertical (percolação) (Brix, 1993).....	13
Figura 2.6 - Representação esquemática de um sistema ESSH (Mendonça Bandejas, 2009).....	14
Figura 2.7 - Representação esquemática de um sistema ESSV descendente (Oliveira, 2008).....	14
Figura 2.8 - Esquema representativo dos três tipos fundamentais de leitos de macrófitas: Flutuantes, Submersas e Emergentes.....	17
Figura 2.9 - Ilustração da <i>Phragmites australis</i> (Catarino et al., 2001).....	18
Figura 3.1 - Ecocanil Espaço circular (Dias, 2020).....	25
Figura 3.2 - (a) Estufa com árvores autóctones; (b) Biotriturador (Dias, 2020).....	25
Figura 3.3 - Fito-ETAR do Ecocanil. (a) Fito-ETAR em fase de arranque; (b) e (c) Fase de operação; (d) Estado atual da Fito-ETAR. Fonte: Município de Amares (jun. 2022).....	26
Figura 3.4 - Esquema ilustrativo do Ecocanil.....	27
Figura 3.5 - <i>Phragmites australis</i> .....	28
Figura 3.6 - <i>Typha latifolia</i> .....	29
Figura 3.7 - <i>Iris pseudacorus</i> .....	30
Figura 3.8 - <i>Juncus effusus</i> (Jardim Botânico UTAD   Flora Digital de Portugal, n.d.).....	30
Figura 3.9 - <i>Lythrum salicaria</i> (Jardim Botânico UTAD   Flora Digital de Portugal, n.d.).....	31
Figura 3.10 - <i>Mentha aquática</i> (Jardim Botânico UTAD   Flora Digital de Portugal, n.d.).....	31
Figura 3.11 - <i>Nymphaea alba</i> .....	32
Figura 3.12 - <i>Myriophyllum spicatum</i> .....	32
Figura 3.13 - Temperatura média de 30 anos na região Norte. Fonte: Portal do clima (jun. 2022).....	33
Figura 3.14 - Variação da temperatura média da região Norte de 1971 a 2000. Fonte: Portal do clima (jun. 2022).....	34
Figura 3.15 - Precipitação média de 30 anos. Fonte: Portal do clima (jun. 2022).....	35
Figura 3.16 - Variação da precipitação média da região Norte de 1971 a 2000. Fonte: Portal do clima (jun.2022).....	35
Figura 3.17 - Temperatura mensal, média, mínima e máxima da estação de Barcelos no ano 2021/2022. Fonte: SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (mar. 2022).....	36
Figura 3.18 - Precipitação mensal, média e observada acumulada e média acumulada, da estação de Barcelos, no ano 2021/2022. Fonte: SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (set.2022).....	37

Figura 4.1 - Esquema ilustrativo dos pontos de controlo e monitorização no Ecocanil. P1 Fito-ETAR; P2 Lago; P3 Torneira; a - Lago do chafariz (LC); b - Fim da fito-ETAR (FFE); c - Caixa de derivação (CD); d - Poço de armazenamento da água (PA). .....	38
Figura 4.2 - Equipamento necessário para as análises “ <i>in situ</i> ” e amostragem. (a) Medidor multiparamétrico portátil Thermo Scientific Orion; (b) Medidor multiparamétrico portátil HACH HQ30d flexi; (c) Material necessário para a amostragem. ....	40
Figura 4.3 – a - Início da Fito-ETAR (P1); b - Lago (P2); c – Torneira (P3). ....	40
Figura 4.4 - Locais de medição de parâmetros “ <i>in situ</i> ” (a) LC; (b) FFE; (c) CD; (d) PA. ....	41
Figura 4.5 - Processo de filtração das amostras em laboratório. ....	42
Figura 4.6 - Impasse na filtração devido às partículas retidas nas membranas. ....	43
Figura 4.7 - Esquema de identificação das amostras. ....	43
Figura 4.8 - Procedimentos realizados para a análise da alcalinidade. ....	44
Figura 4.9 - (a) Amostras já filtradas e preparadas para a C.I; (b) Processo da C.I. ....	45
Figura 4.10 - (a) Reator HI839800 para CQO; (b) Fotómetro Multiparamétrico HI83399 para CQO. ....	45
Figura 4.11 - Amostras antes de serem aquecidas no reator. ....	46
Figura 4.12 - Turbidímetro TB1000. ....	46
Figura 4.13 – Imagens ilustrativas do procedimento para a análise dos SST. ....	47
Figura 4.14 - Representação da manutenção de várias espécies de plantas aquáticas. ....	49
Figura 4.15 – Multiplicação vegetativa da espécie <i>Phragmites australis</i> , inserida numa zona húmida artificial (PhytoClean). ....	50
Figura 4.16 - Biodiversidade observada na PhytoClean. ....	51
Figura 5.1 - Carga orgânica na entrada do afluente no ponto de amostragem P1. (a) Camada de matéria orgânica, 1ª campanha; (b) Dejetos de animas (4ª e 5ª campanha). ....	54
Figura 5.2 - <i>Phragmites australis</i> presente na fito-ETAR na campanha de junho. ....	61
Figura 5.3 - Percentagem de remoção e percentagem de remoção média dos parâmetros CQO, SST e Turbidez, nas 5 campanhas analisadas. ....	63
Figura 5.4 - Média da percentagem de remoção do Li, Al, Fe, Ba e Pb. ....	64
Figura 5.5 - Resultados da classificação hidroquímica das amostras de água. Diagrama de piper .....	65
Figura 5.6 - Diagrama de classificação para água de irrigação. ....	66

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Exemplo de mecanismos de remoção da Fito-ETAR (adaptado de Wallace e Knight, 2006).....	15
Tabela 2.2 - Principais vantagens e desvantagens das ZHA em comparação com os sistemas convencionais (Carty et al., 2008; Oliveira, 2008, 2007; Parde et al., 2021). ....	20
Tabela 2.3 - Valores limite de emissão (VLE) na descarga de águas residuais (Adaptado de Canais Seco et al., 2008). ....	22
Tabela 2.4 - Normas de qualidade da água para reutilização para rega (Diário da República, 2019).....	22
Tabela 2.5 - Periodicidade de amostragem em função da classe de qualidade ou uso: D (Diário da República, 2019). ....	23
Tabela 4.1 - Parâmetros a analisar “in situ” e em laboratório. CE – condutividade elétrica.....	39
Tabela 4.2 - Métodos analíticos usados para descrever as propriedades da água. (ICP-MS= espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente; CI= cromatografia iónica). ....	42
Tabela 5.1 - Resultados dos parâmetros analisados “in situ” dos pontos de amostragem P1, P2, P3 e dos pontos de monitorização, lago chafariz (LC), fundo da Fito-ETAR (FFE), caixa de derivação (CD) e poço de armazenamento (PA). O VMR e VMA correspondem ao DL 236/98, referente à qualidade de águas destinadas à rega. ....	53
Tabela 5.2 - Resultados dos parâmetros analisados em laboratório dos pontos de amostragem P1, P2 e P3. VMR e VMA correspondem ao DL 236/98 referente à qualidade da água destinada à rega e VLE referente à descarga de águas residuais. Todos os resultados são expressos em mg/L, com exceção da turbidez, que se apresenta em NTU e da alcalinidade que está expressa em mg/L de CaCO <sub>3</sub> .....	58
Tabela 5.3 - Resultados dos EPT analisados nas campanhas de março e junho (1 <sup>a</sup> e 4 <sup>a</sup> campanha). Estes estão expressos em mg/L. VMR e VMA referentes ao Decreto-Lei n° 236/98, NQ =Norma de qualidade referente ao Decreto-Lei n° 119/2019 (Normas de qualidade de água para reutilização para rega para proteção das culturas agrícolas, florestais e solos). ....	62

## Abreviaturas

APA - Agência Portuguesa de Ambiente

ApR - Águas para reutilização

CBO – Carência bioquímica de oxigénio

CBO<sub>5</sub> – Carência bioquímica de oxigénio aos cinco dias

CE – Condutividade elétrica

CI – Cromatografia iónica

CQO – Carência química de oxigénio

Eh – Potencial redox

EPT - Elementos potencialmente tóxicos

ESSH – Escoamento sub-superficial horizontal

ESSV – Escoamento sub-superficial vertical

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais

SAR – Razão de adsorção de sódio

SST – Sólidos suspensos totais

TDS – Total de sólidos dissolvidos

VLE – Valor limite de emissão

VMA – Valor máximo admissível

VMR – Valor máximo recomendável

ZHA – Zona húmida artificial

ZHN – Zona húmida natural

## 1. Introdução

A água é um bem essencial para a vida humana, ocorrendo nos dias de hoje uma preocupação crescente no que toca à escassez da disponibilidade deste recurso (Abou-Elela e Hellal, 2012). As maiores fontes de água limpa são referentes às águas superficiais e subterrâneas (Ribeiro et al., 2007). Contudo, estas têm vindo a sofrer variadas contaminações por parte do Homem, muito devido ao crescimento da indústria, dando face, assim, às necessidades básicas da população (Gomes et al., 2018). Desta forma, os afluentes causam inevitavelmente um aumento dos resíduos orgânicos e inorgânicos (Mustafa e Hayder, 2021). Estes eventos trazem problemas para o meio ambiente, tais como, a presença de fármacos, antibióticos, etc (Bila e Dezotti, 2003). Na maioria das vezes, estes contaminantes acabam por se concentrar nos rios, lagos e pequenos cursos de água, podendo representar graves problemas nos sistemas aquáticos em que se inserem, e conseqüentemente, na saúde humana (Gomes et al., 2018). A título de exemplo, a contaminação de águas subterrâneas é muito difícil de detetar, quer pela sua elevada extensão, quer pela difícil visualização, dificultando assim o seu tratamento (Mustafa e Hayder, 2021; Ribeiro et al., 2007).

A fim de se proteger os recursos hídricos é importante a remoção destas substâncias perigosas (EPT), provenientes de águas residuais, por exemplo, descarregadas de indústrias e/ou de fontes municipais. Por isso, existe a necessidade do cumprimento dos requisitos legais, os quais se apresentam cada vez mais exigentes. Face à escassez da água disponível, existe também a necessidade da sua reutilização, sendo deveras importante o tratamento de efluentes e de outras fontes de água (Simon et al., 2018).

Atualmente já são desenvolvidas tecnologias inovadoras e sustentáveis, que apresentam o intuito de reduzir o consumo de água e evitar efeitos secundários sobre o ambiente (Simon et al., 2018). Algumas destas tecnologias apresentam baixo custo de instalação e manutenção, como o caso da fitorremediação (Abou-Elela e Hellal, 2012). Esta técnica baseia-se num sistema de macrófitas, em zonas húmidas artificiais, que apresentam capacidades depuradoras eficientes quando aplicadas em pequenos agregados populacionais, potenciando o bom enquadramento paisagístico (Canais Seco et al., 2008).

As Fito-ETAR são um bom exemplo disso mesmo, sendo atualmente uma tecnologia, capaz de recriar o melhor possível uma zona húmida natural, sendo uma alternativa aos sistemas convencionais de tratamento das águas residuais (Rico, 2018).

A qualidade dos recursos hídricos é um aspeto essencial para a promoção do desenvolvimento económico, para a conservação dos ecossistemas, cumprindo assim os objetivos de sustentabilidade (Gomes, 2021). Num país com escassez deste bem precioso, à semelhança de muitos outros, o conceito de reaproveitamento e reciclagem de água em contexto de economia circular, é cada vez mais pertinente (Gomes et al., 2020).

Desta forma, o trabalho apresentado enquadra-se no estudo da viabilidade do tratamento de água por fitorremediação, num conceito de fito-ETAR. O pretendido é investigar o potencial deste tratamento para a reutilização da água tratada em contexto de irrigação, cumprindo, assim, as mais recentes diretrizes nacionais de reutilização e atendendo aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS - ONU, Agenda, 2030).

### 1.1. Enquadramento do tema e objetivos

A presente dissertação de mestrado enquadra-se, assim, no âmbito do estudo do tratamento de águas residuais por fitorremediação. Face à importância da reutilização da água, o principal objetivo centra-se na avaliação da possibilidade de reutilização do afluente tratado, para fins de irrigação, em contexto de economia circular. Este afluente é proveniente da lavagem de boxes dos animais do ecocanil.

O estudo teve também como objetivos secundários:

- Identificar o mais recente enquadramento legal sobre a reutilização de águas residuais;
- Definir um plano de monitorização, incluindo a componente da amostragem e a componente analítica, alinhado com o quadro legal atual;
- Proceder à recolha de amostras de água de acordo com o estabelecido no plano de monitorização;
- Medir parâmetros "*in situ*" e em laboratório: parâmetros físico-químicos como a temperatura, cor, turbidez, condutividade elétrica, sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos; parâmetros químicos como o pH, alcalinidade, oxigénio dissolvido, cloretos, carência química de oxigénio, entre outros;
- Avaliar potenciais efeitos sazonais na eficiência do tratamento e na qualidade da água tratada;
- Proceder ao tratamento estatístico e interpretação dos resultados;

- Avaliar a conformidade legal da água tratada para efeitos de reutilização.

## **1.2. Estrutura da dissertação**

O presente trabalho encontra-se estruturado em seis Capítulos:

O capítulo 1, referente à introdução, faz um pequeno enquadramento do tema e dos objetivos propostos.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte das zonas húmidas com destaque para as zonas húmidas naturais, zonas húmidas artificiais e as vantagens e desvantagens das mesmas.

O capítulo 3 descreve o local de estudo, espécies usadas e contexto climático.

Os materiais e métodos estão inseridos no capítulo 4 e englobam o plano de monitorização e todo o trabalho envolvente de campo, laboratorial e na empresa PhytoClean.

No capítulo 5, encontram-se os resultados obtidos das colheitas mensais da água do Ecocanil e as discussões das análises realizadas e dos resultados obtidos.

Por último, o capítulo 6, é dedicado às conclusões e perspetivas futuras de trabalho.

## 2. Zonas Húmidas

### 2.1. Zonas Húmidas Naturais

O conceito de zonas húmidas naturais (ZHN) agrupa vários tipos de ecossistemas, desde margens de lagos, pântanos, estuários, leitos de cheia de rios, zonas de água estagnada e zonas de massa de água rasas temporárias. O que estes ecossistemas apresentam em comum é o facto do solo onde se encontram estar alagado durante uma parte ou a totalidade do ano, permitindo assim o aparecimento de flora distinta, típica destas zonas (Mendes, 2010; Oliveira, 2008).

Os ecossistemas como as zonas húmidas começaram a ser reconhecidos por promoverem variados serviços com diferentes funções, tais como de regulação: de gases, climática, de nutrientes, retenção de elementos no solo, de polinização, de controlo biológico, de regulação da água e tratamento desta. A par disso, estes ecossistemas naturais de plantas funcionam como “sistemas tampão”, pois são grandes captadores de CO<sub>2</sub>, auxiliam na redução da temperatura atmosférica (Mendes, 2010).

Apresentam ainda funções de habitat, como de refúgio e de berçário; funções de produção, como: comida, recursos medicinais, recursos ornamentais e matérias-primas; e ainda funções de informação, como: ciência e educação, estética, cultural e artística, espiritual e histórica (de Groot et al., 2002; Mendes, 2010).

Como foi descrito, estes ecossistemas são de elevada importância, estando o seu “valor” dividido em três tipos: ecológico, económico e sociocultural (Figura 2.1).

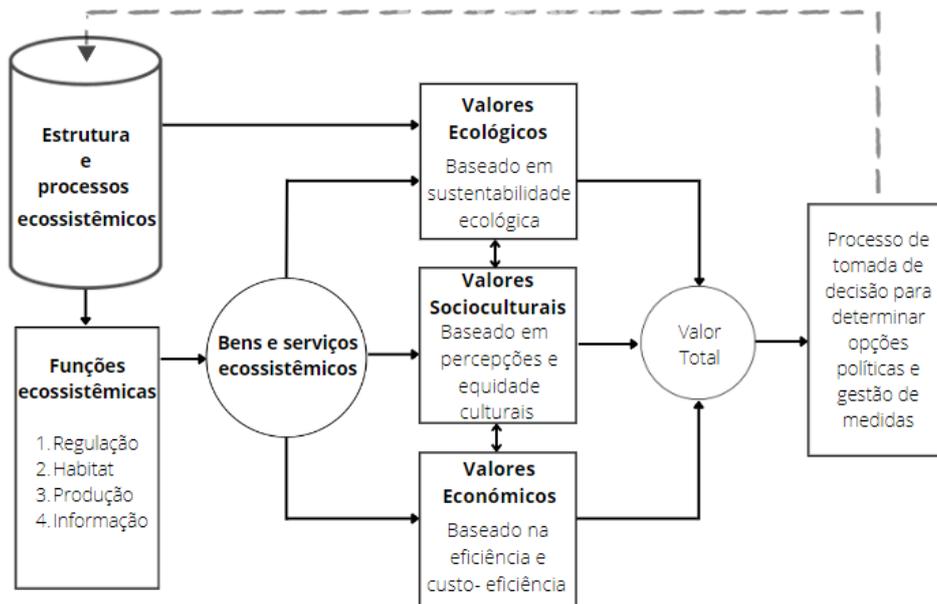


Figura 2.1 - Estrutura para avaliação das funções, bens e serviços do ecossistema (Adaptado de Groot et al., 2002).

As ZHN têm sido usadas mundialmente como local de descarga de águas residuais por muitos séculos, muitas vezes sem a percepção do papel que desempenhavam (Mendes, 2010). Com o estudo do alto potencial de absorção de nutrientes de várias macrófitas, incluindo diferentes tipos de nutrientes e até mesmo substâncias tóxicas, o interesse por este tema aumentou. A absorção de nutrientes, em algumas destas plantas, é elevada, sendo estas capazes de acumular elementos em zonas específicas, tais como raízes, caules ou folhas, que estão na água ou no solo (Gomes, 2011; Gomes et al., 2014; Gopal, 1999; Mendes, 2010).

A transformação e a acumulação de nutrientes nestes sistemas dependem de muitas variáveis como, a concentração de nutrientes presente na água, o regime hidrológico, o tipo de vegetação encontrada no local, o sedimento e toda a biota envolvente (Gopal, 1999; Oliveira, 2007). Os processos que ocorrem nestes locais são diversificados e complexos. As bactérias que crescem nas partes submersas das plantas, caule e raiz, são auxiliadoras, sendo também responsáveis por alguns desses processos (Oliveira, 2007). O escoamento hidráulico nestes locais é geralmente lento devido à quantidade de vegetação existente, o que promove um maior tempo de contacto entre a água e as várias superfícies das zonas húmidas naturais (Mendes, 2010). Outro fator que influencia a eficácia ou não destes sistemas é o substrato em que estão inseridas as raízes destas plantas. Substratos com maior ou menor quantidade de argilas e matéria orgânica, por exemplo,

podem ser cruciais na remoção de contaminantes, muito devido às capacidades de troca catiónica com os mesmos (Gomes, 2011).

Um dos fatores que define as zonas húmidas são as condições hidrológicas, estas são definidas pela frequência, tempo, e duração da inundação/ chuva e da alteração da amplitude do nível da água (Gopal, 1999). Qualquer alteração no volume de água, pode ameaçar todo o ecossistema e a sua integridade (Brinson e Malvárez, 2002; Zedler e Kercher, 2005).

Contudo, apesar destes ecossistemas apresentarem uma capacidade de limpeza das águas, muitos entram em rutura quando são ultrapassados os limites máximos que o sistema é capaz de processar, quer acumulando os nutrientes/substâncias tóxicas no solo ou nos próprios tecidos da planta (Mendes, 2010).

Estes ecossistemas apresentam uma interdependência entre si, e tal como já relatado, são constituintes fundamentais o tipo de substrato, os microorganismos associados às raízes das plantas e as próprias plantas, podendo-se apelidar todo este conjunto por fitorremediação.

### **2.1.1. Fitorremediação**

A fitorremediação (fito: planta + remediação: corrigir) é atualmente um processo cada vez mais estudado, e que se enquadra dentro das técnicas da biorremediação. Este processo consiste na utilização/aplicação de plantas para a remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos que estão presentes na água ou solo, contribuindo assim para a diminuição dos seus efeitos nefastos no meio ambiente (Demarco, 2016). É uma técnica promissora, devido à sua eficiência, baixo custo de implementação e manutenção. A fitorremediação pode ser realizada *in situ*, sendo considerada uma tecnologia “amiga do ambiente” (Coutinho et al., 2015; Rodrigues, 2021).

As plantas, escolhidas para este processo, necessitam de ter certas características especiais, tais como: sistema radicular profundo, elevada taxa de crescimento, boa capacidade de absorção, resistência aos poluentes presentes no meio, entre outras (Coutinho et al., 2015; Gomes, 2011; Gomes et al., 2014).

### **2.1.2. Técnicas de Fitorremediação**

Para a remoção de determinado poluente do solo ou da água é necessário ter em atenção certos aspetos como a natureza e as propriedades do contaminante (se é inerte, volátil ou se pode estar sujeito a degradação na planta ou no solo) e as características da planta, para que assim se

possa escolher a técnica de fitorremediação mais adequada (Figura 2.2) (Bauddh et al., 2017; Pilon-Smits, 2005).

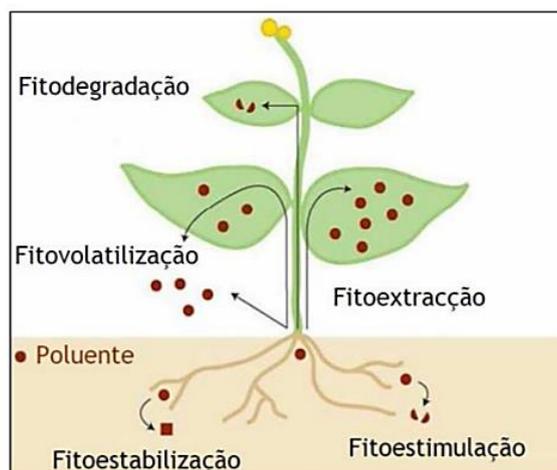


Figura 2.2 - Representação esquemática de técnicas de fitorremediação (Adaptado de Pilon-Smits, 2005).

#### Fitodegradação ou fitotransformação

Esta técnica baseia-se na metabolização ou mineralização dos contaminantes orgânicos que ficam acumulados na planta, através de enzimas específicas (Favas et al., 2014). As espécies *Populus* e *Myriophyllum spicatum* são exemplos de macrófitas que apresentam esse sistema enzimático. Estas espécies, entre outras, têm a capacidade de degradar determinados contaminantes tóxicos tornando-os não tóxicos ou menos tóxicos (Coutinho et al., 2015).

#### Fitovolatilização

A fitovolatilização é a capacidade de certas plantas absorverem e volatizarem o contaminante. É uma técnica usada para contaminantes orgânicos, mas também para certos metais ou metaloides como o mercúrio (Hg), selênio (Se) e o arsênio (As). Estes são absorvidos pela raiz, convertidos em formas não tóxicas e mais tarde libertados para a atmosfera (Favas et al., 2014; Rodrigues, 2021). Contudo, são necessários certos cuidados com esta técnica, pois pode ser prejudicial para o ambiente se as plantas libertarem concentrações muito elevadas de contaminante para a atmosfera (Demarco, 2016).

#### Fitoestimulação ou rizodegradação

Esta técnica apresenta uma interação entre a raiz e o solo promovendo a proliferação de microrganismos na rizosfera, os quais irão degradar os contaminantes. Estes microrganismos

utilizam os exsudados e metabolitos das plantas como fonte de carbono e energia. Para que esta técnica apresente bons resultados é necessário escolher a espécie que apresenta melhor capacidade de promover proliferação de microrganismos (Coutinho et al., 2015; Soares et al., 2007).

#### Fitoextração ou fitoacumulação ou fitoabsorção

A fitoextração utiliza preferencialmente plantas hiperacumuladoras. Esta baseia-se na absorção de contaminantes pelas raízes, que mais tarde são translocados e acumulados nas raízes e nas partes aéreas da planta (Favas et al., 2014). Certos aspetos são necessários ter em conta para um resultado satisfatório desta técnica, tais como: o grau de contaminação do solo, a biodisponibilidade do contaminante, a produção de biomassa das plantas e a sua capacidade de acumulação. São consideradas plantas hiperacumuladoras aquelas que toleram altas concentrações de metais. Existem aproximadamente 400 espécies capazes de utilizar a hiperacumulação (Coutinho et al., 2015).

#### Fitoestabilização

Contaminantes orgânicos e inorgânicos são imobilizados, incorporados na parede celular das células radiculares, onde mais tarde ficarão retidos na matriz do solo. O principal objetivo desta técnica é evitar a erosão e a dispersão de contaminantes no ambiente circundante (Coutinho et al., 2015; Favas et al., 2014; Gomes, 2011). Segundo diversos autores (Chaney et al., 1997; Gomes, 2011; Gomes et al., 2014; McGrath et al., 2002; McGrath e Zhao, 2003; Schnoor, 1997) a fitoestabilização, de entre as técnicas de fitorremediação apresentadas, é apontada, não só como uma das mais economicamente viáveis, mas também uma das que, do ponto de vista ambiental, imprime um carácter de maior sustentabilidade ao ecossistema.

Apesar de existirem outras técnicas alguns autores consideram-nas categorias da fitorremediação, as quais acabam por ser técnicas mistas ou variações das descritas acima. Estas incluem: Barreiras hidráulicas; Cobertura vegetal; Fitodesalinização; Zonas húmidas artificiais (Favas et al., 2014).

## 2.2. Zonas Húmidas Artificiais para o tratamento de águas residuais

### 2.2.1. Caracterização das Fito-ETAR

As fito-ETAR podem ser exemplos de zonas húmidas artificiais (ZHA), que foram inicialmente desenvolvidas na Europa e América do Norte, há 40 anos. Estas, criadas para o tratamento de águas residuais, têm como objetivo recriar o ambiente natural das ZHN. Estes sistemas permitem explorar e melhorar a capacidade de biodegradação por parte das plantas (Shutes, 2001). Apesar da construção típica, em muitos países, de grandes sistemas de tratamento de águas residuais, recorrendo a meios tecnológicos e produtos químicos, o crescente interesse por ZHA e a sua facilidade de implementação associado a tecnologias ecológicas, de fácil manutenção no tratamento de águas residuais, são motivo de interesse, e conseqüente expansão.

Houve por isso, uma mudança no tratamento das águas residuais e controlo da poluição e um aumento frequente na utilização destes sistemas no mundo. Atualmente devido à escassez de recursos é importante a reutilização dos mesmos, o que levou a um aumento nos estudos sobre processos naturais das ZHN (Oliveira, 2007).

As zonas húmidas artificiais são usualmente recomendadas como tratamento secundário ou terciário devido aos seus níveis de eficácia altos (Gopal, 1999).

As fito-ETAR apresentam diversos tipos de configurações e podem ser classificadas baseando-se nas seguintes características (Mendes, 2010; Oliveira, 2008):

- Tipo de macrófitas dominantes (submersa, emergente ou flutuante);
- Configuração dos leitos (sistemas híbridos, de uma passagem ou com recirculação);
- Tipo de efluente (doméstico, industrial, agrícola e lixiviados de aterros sanitários ou de atividades mineiras);
- Tratamento exigido (secundário, terciário ou de afinação);
- Meio de enchimento (brita, areia, seixo rolado, argila expandida ou material sintético);
- Tipo de carga (contínuo ou descontínuo).

O sistema mais comum para a classificação das fito-ETAR inclui o tipo de escoamento:

- Escoamento superficial;
- Escoamento sub-superficial: horizontal e vertical.

A Figura 2.3 apresenta uma classificação geral dos diversos sistemas de uma fito-ETAR. Inclui o tipo de substrato da fito-ETAR, o tipo de escoamento, a vegetação presente e o tipo de fluxo (Wallace e Knight, 2006).

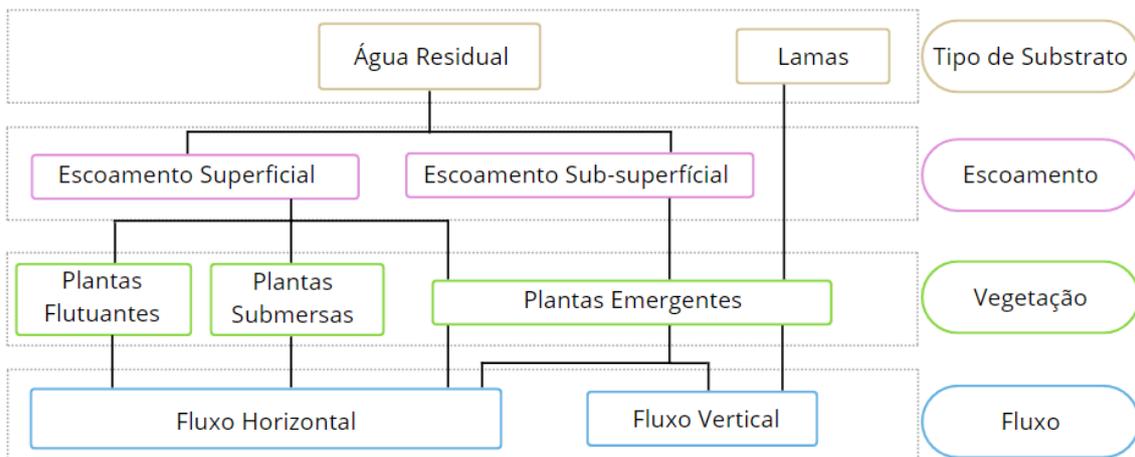


Figura 2.3 - Classificação geral das ZHA (Adaptado de Wallace e Knight, 2006).

### 2.2.2. Funcionamento das Fito-ETAR e processos de remoção de poluentes

Para projetar uma Fito-ETAR é necessário conhecer a estrutura e a dinâmica das ZHN. Como descrito anteriormente, as ZHA são recomendadas como zonas de tratamento secundário ou terciário. Podem-se considerar três níveis de tratamento para as águas residuais, primário, secundário e terciário (Costa e Barros Júnior, 2005; Wilson et al., 1998).

#### Tratamento primário

Remove 20 a 40% da carência bioquímica de oxigênio (CBO) e 40 a 60% de sólidos em suspensão.

#### Tratamento secundário

Remove até 85% da CBO e 85 a 90% os sólidos em suspensão. Este tratamento acelera os processos naturais de eliminação dos resíduos através de bactérias aeróbicas as quais, na presença de oxigênio, oxidam a matéria orgânica em compostos como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, nitratos, fosfatos, entre outros.

### Tratamento Terciário

Remove valores próximos de 99% da CBO assim como os sólidos em suspensão. Este tratamento é usado para eliminar nutrientes. Os sólidos em suspensão são removidos por osmose reversa e eletrodialise.

As características da água a ser tratada é de extrema importância, pois assim pode ser escolhido o processo mais indicado para o seu tratamento (Figura 2.4). A composição das águas residuais depende das características do sistema de esgoto. Como já foi mencionado neste trabalho, podem ser de águas residuais de uso doméstico, industriais ou até mesmo uma mistura das duas, a qual se denomina como águas residuais urbanas (Oliveira, 2008).

As águas residuais domésticas, contém cerca de 60 a 80% de matéria orgânica de fácil degradação e entre 20 a 40% de compostos de difícil degradação como detergentes, óleos e hidrocarbonetos. Podem existir também nestas águas microrganismos como vírus, fungos, bactérias, protozoários e até mesmo alguns agentes patogénicos que podem provocar doenças como a hepatite A, gastroenterites, entre outras. É, então, necessário a remoção da carga poluente das águas residuais para que o efluente final, quando já tratado, possa ser reutilizado com diferentes aplicações seguindo sempre as legislações para cada aplicação (Oliveira, 2008).

As Fito-ETAR de forma geral são compostas por órgãos de tratamento preliminar, onde são removidos os sólidos de maior dimensão, o tratamento primário (fossa séptica) e o tratamento secundário, o qual pode conter um ou mais leitos de macrófitas (Mendes, 2010).

Este processo de tratamento apresenta três componentes principais (Mendes, 2010; Wallace e Knight, 2006):

Componente fixa – inclui a matriz/solo, a zona da rizosfera e os biofilmes (agregados microbianos que se desenvolvem espontaneamente nas condições adequadas).

Componente hídrica – inclui a água que está presente na matriz e o efluente.

Componente atmosférica – inclui a passagem de gases para o interior e exterior do meio/matriz e para o meio hídrico.

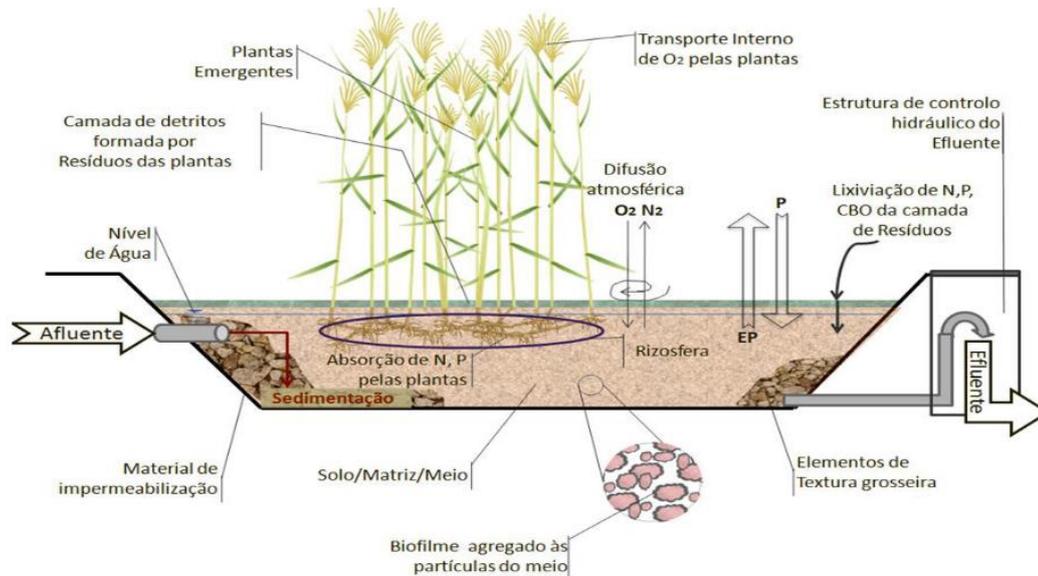


Figura 2.4 - Processos e mecanismos mais relevantes em sistemas de escoamento sub-superficial (Mendes, 2010).

Existem dois tipos de sistemas de escoamento, sistemas de escoamento superficial e sistemas de escoamento sub-superficial (ESS) (Figura 2.5), os quais podem ser horizontais ou verticais (Mendes, 2010; Oliveira, 2008).

### Escoamento superficial

Este tipo de sistema (Figura 2.5 - a), mais frequente nos Estados Unidos do que na Europa (Rico, 2018), caracteriza-se por apresentar o nível hídrico acima da superfície do leito ou do meio de enchimento. Este facto permite boas condições para a formação de biofilmes. Os tipos de mecanismos de remoção podem ser anaeróbios, aeróbios e anóxicos. Estes dependem da configuração do leito, da altura da água, das características do efluente e da planta usada, a temperatura, entre outros. Neste sistema são usadas macrófitas flutuantes, submersas ou emergentes. O meio onde estão inseridas tem normalmente uma profundidade entre 0,3 a 1,0 m e declives de fundo entre 0,5% a 1,5%, este mesmo meio de enchimento à base de brita e/ou areão apresenta uma espessura reduzida entre 0,10 a 0,20 m e o corpo de água geralmente pouco profundo entre 0,5 a 1,0 m. Uma desvantagem deste sistema de escoamento superficial é a proliferação de insetos e cheiros desagradáveis, devido ao efluente estar em contacto com a atmosfera (Oliveira, 2008; Santos, 2011).

As macrófitas mais usadas neste sistema são a *Typha latifolia*, a *Phragmites australis* e o *Scirpus lacustris* (emergentes), *Eichhornia crassipes* e *Lemna* spp. (flutuantes) e a *Potamogeton pectinatus* e *Elodea canadensis* (submersas) (Santos, 2011).

### Escoamento sub-superficial

Este sistema caracteriza-se por possuir o nível hídrico abaixo da superfície do leito. A sua profundidade pode variar entre 0,3 e 1,0 m, sendo mais comum a profundidade de 0,6 m. Este sistema tem como vantagem a redução dos odores, de insetos e do contacto das pessoas com a água residual, uma vez que a água está abaixo da superfície do leito (Mendes, 2010). Consoante o tipo de alimentação do sistema é possível distinguir os sistemas de escoamento sub-superficial horizontal (ESSH) e os de escoamento sub-superficial vertical (ESSV) (Figura 2.5 - b e c).

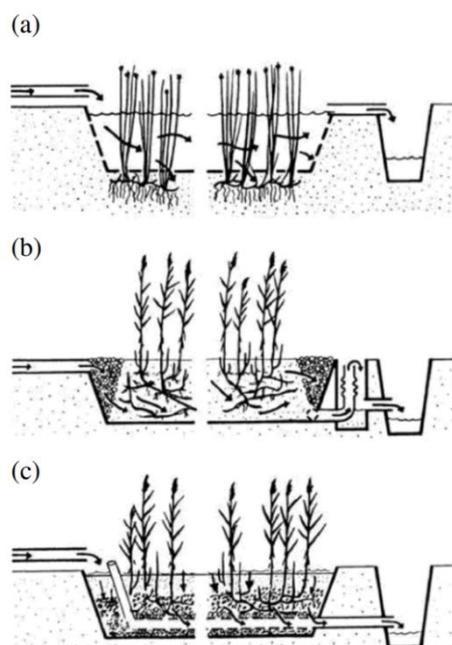


Figura 2.5 - Representação dos diferentes tipos de escoamento e o seu respetivo fluxo. (a) escoamento superficial; (b) escoamento sub-superficial com fluxo horizontal (translação); (c) escoamento sub-superficial com fluxo vertical (percolação) (Brix, 1993).

O sistema ESSH (Figura 2.6) é o mais usado em Portugal e na maioria dos países europeus e mediterrâneos. O afluente (água residual que se encontra à entrada dos leitos de macrófitas para ser depurada) é distribuído logo à entrada do leito percorrendo horizontalmente o meio poroso e a rizosfera, não existindo assim escoamento superficial. Enquanto o afluente desloca-se

lentamente pela rizosfera, local onde o solo e as raízes das plantas se encontram, ocorrem mecanismos de adsorção, precipitação e de degradação microbiana (Oliveira, 2008; Santos, 2011). A recolha do efluente depurado é realizada na extremidade oposta à entrada.

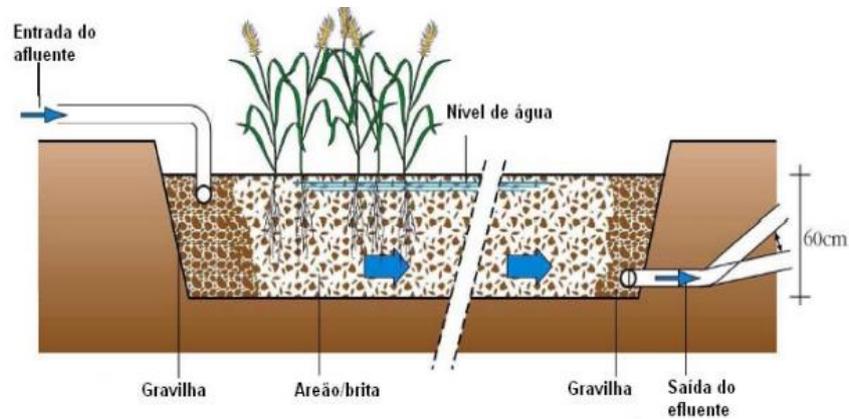


Figura 2.6 - Representação esquemática de um sistema ESSH (Mendonça Bandejas, 2009).

O sistema ESSV pode apresentar dois sentidos de escoamento, ascendente ou descendente (mais comum) (Figura 2.7). O sistema vertical ascendente realiza-se por capilaridade e contra-corrente, com a utilização de sistemas mecânicos (Mendes, 2010). No sistema descendente o afluente passa verticalmente pela superfície do leito, havendo uma infiltração mais rápida até à base do leito onde mais tarde será recolhida. A eficiência deste sistema na remoção de poluentes depende também da capacidade de arejamento do solo e das propriedades do material de enchimento (Oliveira, 2008; Rico, 2018).

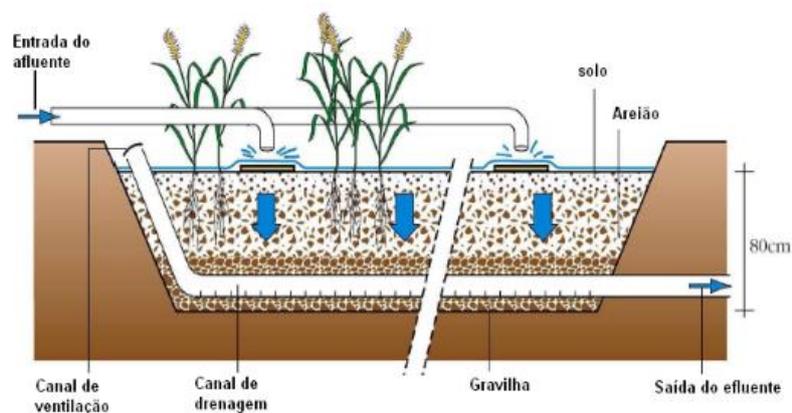


Figura 2.7 - Representação esquemática de um sistema ESSV descendente (Oliveira, 2008).

As fito-ETAR caracterizam-se por serem sistemas heterogéneos, pois apresentam condições de oxidação-redução, fases aeróbias e anaeróbias. São também sistemas dinâmicos que possuem flutuações, as quais são mais intensas na camada superior do leito, nos parâmetros dos processos intrínsecos, mas também nos extrínsecos (parâmetros ambientais), tais como: precipitação, exposição solar, vento, a curto e a longo prazo (Mendes, 2010). A vegetação é também um fator importante dos parâmetros ambientais de variação espacial e temporal (Truu et al., 2009). Na Tabela 2.1 estão referidos alguns mecanismos de remoção da fito-ETAR.

Tabela 2.1 - Exemplo de mecanismos de remoção da Fito-ETAR (adaptado de Wallace e Knight, 2006).

Parâmetros	Mecanismos Físicos	Mecanismos Químicos	Mecanismos Biológicos
Sólidos Suspensos	Sedimentação	—————	Degradação microbiana
CBO <sub>5</sub>	Sedimentação	—————	Degradação microbiana
CQO	Sedimentação	—————	Degradação microbiana
Metais	Sedimentação	Precipitação; Adsorção; Troca iónica	Captação pelos microorganismos; Captação pelas plantas
Hidrocarbonetos de petróleo	Volatilização	Adsorção	Captação pelos microorganismos; Captação pelas plantas
Hidrocarbonetos sintéticos	Sedimentação; Volatilização	Adsorção; Volatilização (NH <sub>4</sub> )	Captação pelos microorganismos; Captação pelas plantas
Compostos azotados	Sedimentação	Precipitação; Adsorção	Captação e transformação pelos microorganismos; Captação pelas plantas
Fósforo orgânico e inorgânico	Sedimentação	—————	Captação pelos microorganismos; Captação pelas plantas
Organismos patogénicos	Sedimentação	—————	Mortalidade natural; Predação microbiana

A reutilização das águas residuais tratadas nestes ecossistemas, voluntaria ou involuntariamente, tem um importante papel na economia circular. Esta pode ser utilizada, por exemplo, em locais onde usualmente se usava água potável para necessidades como sistemas decorativos (fontes, chafariz), descargas de casas de banho, lavagem de carros, irrigação de campos, indústria, entre outras. Desta forma, pode ser substituída por água não potável tratada,

havendo um maior aproveitamento deste recurso, o qual tem vindo a diminuir significativamente (Costa e Barros Júnior, 2005; Monte e Albuquerque, 2010).

### 2.2.3. Classificação dos leitos de macrófitas

O termo macrófita (macro: grande + phyton: planta) é usado para plantas macroscópicas, contudo, na prática é mais aplicado a plantas aquáticas. São designadas plantas aquáticas aquelas que apresentam o seu ciclo de vida, ou pelo menos parte dele, ligado à água ou ambientes húmidos, podendo também se designar por hidrófitas (Mendes, 2010).

Para o tratamento de águas residuais nas fito-ETAR são usadas maioritariamente plantas emergentes, como a *Phragmites*, *Typhas*, *Juncus*, entre outras, devido às suas capacidades de adaptação, crescimento e desenvolvimento.

Segundo vários estudos são considerados três tipos fundamentais de leitos de macrófitas (Figura 2.8) (Demarco, 2016; Mendes, 2010; Oliveira, 2008; Rico, 2018):

#### Macrófitas emergentes

Os sistemas baseados em macrófitas emergentes são os mais frequentes, pois permite os dois tipos de fluxos já mencionados, o fluxo vertical e horizontal. São plantas enraizadas no solo com as folhas e a maior parte do seu caule fora de água. Geralmente encontram-se nas margens alagadas dos cursos e massas de água. Tem-se como exemplo a espécie mais usada na fitoremediação, *Phragmites australis*, mais conhecida como o caniço, a *Typha latifolia*, a *Iris pseudocorus* (lírio do pântano) e o *Scirpus lacustris* (junco) (Demarco, 2016; Oliveira, 2008).

#### Macrófitas flutuantes (enraizadas ou livres)

Neste grupo incluem-se plantas que flutuam à superfície da água, estas podem ser enraizadas, as raízes estão agarradas ao sedimento, mas as suas folhas estão à superfície da água, como a *Nymphaea* sp. Ou podem ser livres, não estão enraizadas no leito, como a *Lemna* spp. e a *Azolla filiculoides*.

#### Macrófitas submersas

Plantas ancoradas ao solo ou em suspensão na água, crescem totalmente submersas, embora muitas vezes os órgãos reprodutores estejam à superfície ou acima dela. É o caso da espécie *Potamogeton pectinatus* (limo-mestre) e da *Elodea canadensis* (elódea).

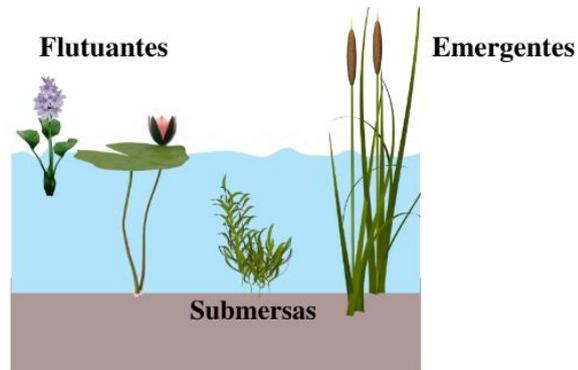


Figura 2.8 - Esquema representativo dos três tipos fundamentais de leitos de macrófitas: Flutuantes, Submersas e Emergentes.

O papel destas plantas no tratamento de águas residuais é muito importante e eficaz. Isto deve-se ao facto destas plantas possuírem um tipo de parênquima condutor e aerífero, designado por aerênquima, que lhes permite um melhor desenvolvimento em terrenos encharcados onde plantas comuns morreriam por asfixia radicular (Oliveira, 2008). Estas espécies com aerênquima e caules ocos, como a *Phragmites australis* (Figura 2.9), conseguem criar concentrações internas de oxigénio elevadas e conseqüentemente em volta das suas raízes no meio externo, rizosfera (Oliveira, 2008). Estes meios ricos em oxigénio proporcionam boas condições para processos como a oxidação-redução, que estimulam a decomposição aeróbia da matéria orgânica e o crescimento de bactérias (Ferreira Mavioso, 2010; Relvão, 1999).

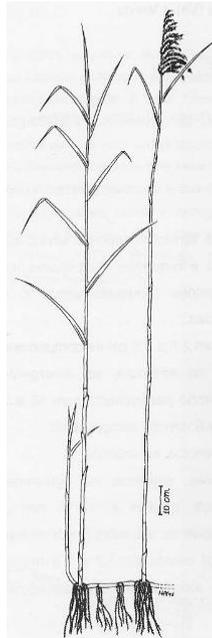


Figura 2.9 - Ilustração da *Phragmites australis* (Catarino et al., 2001).

#### 2.2.4. Manutenção das plantas

A manutenção das plantas nas ZHA é uma das razões que torna este processo tão chamativo pois, não necessita de muita manutenção, nem custos elevados. A manutenção da vegetação passa por alguns pontos como o controlo do nível da água (a menos de 300 mm para que possa ser assegurado um bom crescimento das plantas). Contudo a maioria das macrófitas toleram períodos curtos de aumento da profundidade até 500 mm, bem como a ausência da água durante o tempo mais seco. Pode ser necessário a intervenção, caso espécies indesejáveis, pragas por exemplo, colonizem as ZHA (Carty et al., 2008).

Contudo, pode haver despesas adicionais, devido à acumulação de lama no material de enchimento ou eutrofização, podendo levar a problemas futuros na distribuição do fluxo e na saída do efluente (Gunes et al., 2011).

Dependendo da macrófita implementada na fito-ETAR, o tipo de manutenção necessário pode variar. Por exemplo, as lentilhas de água (*Lemna* spp.) apresentam uma biomassa muito baixa, mas uma taxa de crescimento bastante elevada por isso, é necessária uma recolha mais frequente. O seu papel principal é a remoção de nutrientes de uma camada fina de água. O jacinto de água, utilizado em outros países, também necessita de uma recolha frequente, mas apresenta um melhor potencial de remoção de nutrientes e redução de partículas em suspensão. Por outro lado,

plantas de maior porte, como a *Typha latifolia* e *Phragmites australis* só têm de ser colhidas uma vez por ano (Gopal, 1999). Estas devem ser podadas periodicamente (Oliveira, 2008).

### **2.3. Vantagens e desvantagens das zonas húmidas artificiais (ZHA)**

Apesar dos sistemas convencionais de tratamento de águas residuais, lamas ativadas, leitos percoladores ou discos biológicos fazerem face ao controlo de poluição nos grandes aglomerados populacionais, estes dependem de energia proveniente de recursos não renováveis, como os combustíveis fósseis. Este tipo de sistemas requer também um controlo a tempo inteiro e trabalhadores especializados que garantam o bom funcionamento dos processos e equipamentos utilizados (Ferreira Mavioso, 2010).

Em contrapartida a imitação dos sistemas naturais, ZHA, apresenta baixo nível tecnológico e, por isso, necessita de menos processos de manutenção e operação (Ferreira Mavioso, 2010).

A Tabela 2.2 resume as principais vantagens e desvantagens das zonas húmidas artificiais em relação aos sistemas convencionais de tratamento de águas residuais (Gopal, 1999; Parde et al., 2021).

Tabela 2.2 - Principais vantagens e desvantagens das ZHA em comparação com os sistemas convencionais (Carty et al., 2008; Oliveira, 2008, 2007; Parde et al., 2021).

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixo custo de operação e manutenção;	Cada espécie tem diferentes taxas de remoção de poluentes;
A água tratada pode ser utilizada para fins recreativos e de jardinagem;	O processo de tratamento nas ZHA leva tempo em comparação com outros processos de tratamento. No verão a eficácia de remoção de muitas espécies melhora quando comparada com o inverno;
Maior eficiência na remoção do CBO, CQO e TDS;	Possibilidade de plantas introduzidas se tornarem invasoras;
Ajudam na remoção de Azoto e fósforo;	Se o sistema não for gerido convenientemente pode originar maus odores e a proliferação de organismos patogénicos e insectos.
Escoamento e gestão de cheias;	Se as concentrações dos poluentes for muito elevada pode acabar por ser tóxico para as plantas;
Minimização do odor;	Necessário uma maior área para implantação que os sistemas convencionais;
Esteticamente agradável à vista;	Colmatação do leito devido às elevadas concentrações de matéria orgânica.
Aumento da biodiversidade e fornecimento de habitats para a vida animal;	
A biomassa retirada tem diferentes tipos de aplicação;	
Utilização de processos naturais;	
Não necessita de pessoal qualificado para a manutenção do sistema;	
Baixa produção de lamas.	

A eutrofização é um processo que pode desencadear também interferências no sistema da fito-ETAR. Este pode ser definido como o crescimento excessivo das plantas, devido à elevada carga orgânica nos leitos. Sendo um processo que aumenta as concentrações de elementos biogénicos, principalmente o fósforo e o azoto, em formas inorgânicas e orgânicas dissolvidas, acaba por limitar assim a biodiversidade do sistema (Demarco, 2016; Patrícia Borges, 2014).

A escolha das espécies mais adequada à depuração a utilizar nas fito-ETAR deve-se basear em certos aspetos (Canais Seco et al., 2008; Mendes, 2010):

- Apresentem crescimento rápido;
- Em caso de leitos com alturas superiores a 0,6 m deve optar-se por Phragmites, pois as suas raízes conseguem atingir 1 m de profundidade;

- Se os afluentes apresentarem elevados teores de sódio, como acontece nas águas residuais em povoações do litoral, onde pode ocorrer intrusão de águas salobras, deve-se utilizar *Phragmites australis* ou *Phragmites vulgaris*;

- Desenvolvimento rápido das raízes;
- Elevado rendimento na depuração das águas residuais e eliminação dos nutrientes;
- Que possuam uma utilidade posterior à depuração como, a incorporação na compostagem;
- Fácil controlo;
- Elevada resistência à salinidade e outros contaminantes.

#### 2.4. Enquadramento legal para reutilização da água

No contexto atual de seca extrema que se tem experienciado em todo o mundo é imperativo repensar a utilização de águas residuais para rega, por exemplo, de espaços públicos e campos agrícolas.

Em Portugal existe legislação específica que regula a aplicação de parâmetros de qualidade da água, dependendo da sua aplicação, recolha, tratamento e de descarga de águas residuais no meio aquático. A Diretiva 2000/60/CE, que entrou em vigor em dezembro de 2000, diz que “a água não é um produto comercial como outro qualquer, mas um património que deve ser protegido, defendido e tratado como tal”. Esta diretiva estabelece uma mudança da política de gestão da água, centrando-se mais no ambiente e na importância do seu uso eficiente, diminuindo assim, a pressão existente sobre os recursos hídricos (Ferreira Mavioso, 2010).

Por isso, devido às alterações climáticas e às condições de seca severa ou extrema que se tem experienciado, não só em Portugal, como em muitos outros países, urge uma necessidade indispensável de reutilização. Desta forma, surge o Decreto-Lei nº 119/2019, Artigo 33º, o qual descreve as classes de rega e os seus respetivos usos e nível de tratamento adequado, em função das várias classes de qualidade da água.

Como este trabalho pretende avaliar a possibilidade da reutilização da água para fins de rega, de uma água residual tratada numa fito-ETAR, é necessário, por isso, estudar o enquadramento legal sobre a reutilização de águas residuais. Como se trata de uma água residual tratada para efeitos de reutilização em estufa, contendo espécies arbóreas autóctones não comestíveis, a classe que mais se adequa é a classe D. O Decreto-Lei nº 119/2019 descreve a classe D como uma rega com algumas restrições de acesso (usos agrícolas): produção de

sementes; rega de áreas de uso naturalmente restrito (sebes, áreas de contenção (prados em socacos) (Presidência do Conselho de Ministros, 2019).

De entre os Decretos-Lei, portarias e diretivas da gestão da água e o seu reuso, segue um resumo daqueles que mais se destacam para este trabalho (EU, 1991; Ministério do Ambiente, 1998, 1997; Presidência do Conselho de Ministros, 2019):

- Decreto-Lei nº 152/97, de 19 de junho, transpõe a Diretiva do Conselho, 91 /271 /CEE, de 21 de maio de 1991 relativa à conceção dos sistemas de drenagem e de tratamento de águas residuais urbanas e industriais.

- Decreto-Lei nº 236/98, de 1 de agosto, estabelece normas e critérios que visam proteger o meio aquático e melhorar a qualidade da água em função do seu respetivo uso (Tabela 2.3).

- Decreto-Lei nº 119/2019, de 21 de agosto, é relativo ao regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como a sua utilização (Tabela 2.4).

Tabela 2.3 - Valores limite de emissão (VLE) na descarga de águas residuais (Adaptado de Canais Seco et al., 2008).

Parâmetros	Unidades	VLE	VLE	Eficiência mínima (DL 152/97)
		DL236/98	DL152/97	
CBO <sub>5</sub>	mg/L O <sub>2</sub>	40	25	70-90
CQO	mg/L O <sub>2</sub>	150	125	75
SST	mg/L	60	35	90
Fósforo total	mg/L	10	2	80
Azoto total	mg/L	15	15	70-80

Tabela 2.4 - Normas de qualidade da água para reutilização para rega (Diário da República, 2019)

Classe de qualidade (¹)	CBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> )	SST (mg/L)	Turvação (NTU)	<i>E. coli</i> (ufc/100 mL)	Ovos de parasitas intestinais (Nº/L) (²)	Azoto amoniacal (³) (mg NH <sub>4</sub> ⁺/L)	Azoto total (³) (mg N/L)	Fósforo total (³) (mg P/L)
A.....	≤10	≤10	≤5	≤10		10	15	5
B.....	≤25	≤35		≤100				
C.....	≤25	≤35		≤1000	≤1			
D.....	≤25	≤35		≤10000	≤1			
E (⁴).....	≤40	≤60		≤10000				

(¹) Descrição no Quadro 2.

(²) Aplicável na rega de culturas agrícolas destinadas ao consumo animal.

(³) Parâmetro facultativo. Poderá ser aplicável em alguns projetos de rega para minimização dos riscos de formação de biofilme e obstrução dos sistemas de rega.

(⁴) Só aplicável a sistemas descentralizados ou descentralizados em simbiose.

Como este trabalho apresenta a intenção da possível reutilização de água para irrigação de substâncias não comestíveis, o mesmo foca-se no Decreto-Lei nº 119/2019, relativo ao regime jurídico de produção de água para reutilização (ApR). O Anexo V, do mesmo decreto, é referente à monitorização nas ApR em função do tipo de usos e estipula como monitorização os seguintes parâmetros: pH e o CBO<sub>5</sub> (Diário da República, 2019). Já a tabela 2.5 diz respeito à periodicidade de amostragem. Esta refere que os parâmetros a amostrar relativamente à classe D (irrigação de substâncias não comestíveis) são o CBO<sub>5</sub>, SST, E.coli e Ovos de parasitas intestinais.

Tabela 2.5 - Periodicidade de amostragem em função da classe de qualidade ou uso: D (Diário da República, 2019).

Classe de qualidade/uso	Parâmetros	Periodicidade de amostragem
D Rega	CBO <sub>5</sub>	( <sup>1</sup> )
	SST	( <sup>1</sup> )
	E.coli	Quinzenal
	Ovos de parasitas intestinais	Quinzenal ( <sup>2</sup> )

(<sup>1</sup>) Em função do volume produzido e/ou utilizado:

- a) Até 300 m<sup>3</sup> /dia: Amostragem trimestral;
- b) Entre 300 e 1500 m<sup>3</sup> /dia: Amostragem mensal, podendo passar a trimestral nos anos seguintes, se se provar que durante o primeiro ano a água cumpre as disposições do presente decreto-lei; se uma das 4 amostras colhidas nos anos subsequentes não cumprir os requisitos, deverão no ano seguinte ser colhidas 12 amostras;
- c) Entre 1500 e 7500 m<sup>3</sup> /dia: Amostragem mensal;
- d) Acima de 7500 m<sup>3</sup> /dia: Amostragem quinzenal.

(<sup>2</sup>) Após 1 ano de amostragem, a periodicidade de amostragem poderá ser revista em função dos resultados obtidos

Segundo o Guia para a reutilização de água da APA, dependendo dos diferentes cenários de exposição devem-se aplicar barreiras ou medidas de prevenção para cada recetor. Estas barreiras podem ser físicas ou químicas e são mecanismos que ajudam a diminuir o contacto da água com o recetor de modo a reduzir as vias de exposição, ingestão, inalação ou contacto dérmico. As barreiras podem ser aplicadas no tratamento ou sistemas de distribuição, no armazenamento e aplicação das ApR (Rebelo e Franco, 2019).

Alguns dos métodos que podem ser utilizados para diminuir a passagem de microrganismos patogénicos da água para o recetor são (Rebelo e Franco, 2019):

- Desinfecção;
- Separação física pré-existente entre o recetor e a água;

- Instalação de barreiras físicas (coberturas resistentes ao sol entre o solo e as plantas);
- Sistemas de rega (rega gota-a-gota ou rega sub-superficial);
- Suspensão da rega antes da colheita.

### 3. Descrição do local de estudo

A fito-ETAR em estudo situa-se no concelho de Amares, distrito de Braga. Esta faz parte de um canil, sendo o primeiro “Ecocanil” de Portugal (Figura 3.1), o qual tem sido referenciado como um exemplo Nacional.



Figura 3.1 - Ecocanil Espaço circular (Dias, 2020).

O Centro de Bem Estar Animal foi construído de raiz, num modo ecológico, tendo sido inaugurado a 5 de junho de 2021 (<https://amares.pt>). Apresenta-se com os objetivos de ajudar no combate ao abandono dos animais de companhia e na promoção da sua adoção. Este projeto promove também as práticas de economia circular, tendo como base o reaproveitamento da água, de biomassa (através da compostagem), da construção das boxes dos animais, entre outros.

Assim, o “Ecocanil” fornece um espaço de sensibilização à população, apelando à importância da economia circular e o respeito pelos animais, permitindo visitas de escolas e famílias. Este centro distingue-se por possuir dois lagos para reaproveitamento das águas da chuva, uma fito-ETAR, a qual não necessita da utilização de químicos, uma estufa com árvores autóctones e um biotriturador (Figura 3.2), que permite o reaproveitamento de recursos já usados, dando-lhes uma nova utilização.

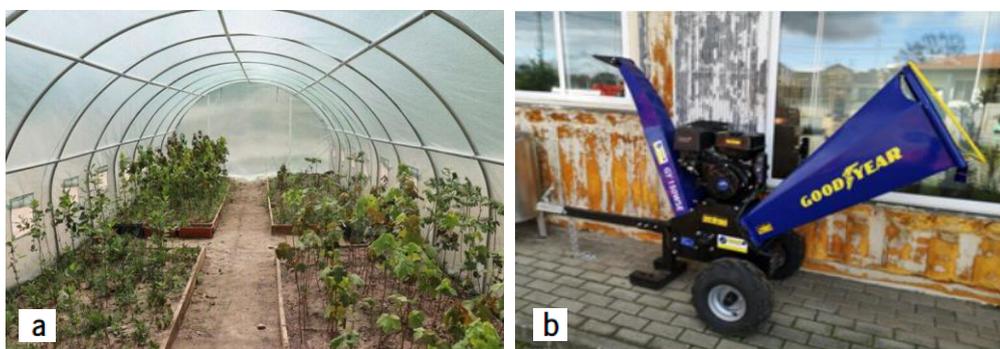


Figura 3.2 - (a) Estufa com árvores autóctones; (b) Biotriturador (Dias, 2020).

Após a abertura do ecocanil e com o início do funcionamento da fito-ETAR (Figura 3.3), existe a necessidade de manutenção desta estrutura, de forma a assegurar o constante tratamento da água.

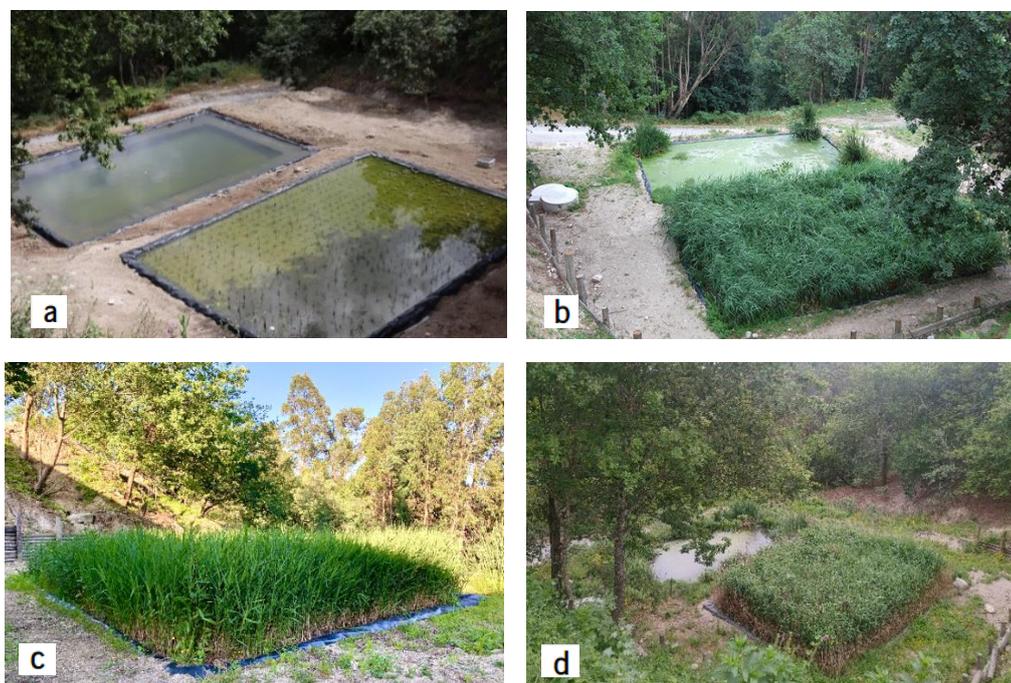


Figura 3.3 - Fito-ETAR do Ecocanil. (a) Fito-ETAR em fase de arranque; (b) e (c) Fase de operação; (d) Estado atual da Fito-ETAR. Fonte: Município de Amares (jun. 2022)

Um dos aspetos importantes deste projeto é a promoção da economia circular. A reutilização da água neste contexto é um elemento-chave de elevada importância, pois é um local onde o gasto de água é alto, existindo sempre desperdício desta.

Na figura 3.4, está representado um esquema do espaço do Ecocanil e a circulação da água até sua reutilização.

O início do tratamento da água começa quando o afluente, água suja depois de ser usada na limpeza do canil, entra na fossa séptica. Neste primeiro ponto ocorre uma primeira fase de depuração, com a decantação de sólidos. De seguida, o efluente entra na fito-ETAR onde inicia o tratamento do mesmo através de espécies de plantas específicas, relatado no ponto abaixo. De seguida, o efluente passa para o primeiro lago, o qual contém outras espécies de plantas usadas no seu tratamento. Este lago, de elevada importância, permite não só o tratamento por fitorremediação, como auxilia, através da luz solar (UV), na remoção de elementos nefastos, como vírus e bactérias.

No final do tratamento, a água que sai deste lago, apelidado de lago 1, é armazenada num poço para ser novamente reutilizada na lavagem das boxes, sanitários, no regadio de árvores da estufa e no lago 2, o qual apresenta intuito ornamental (Dias, 2020).

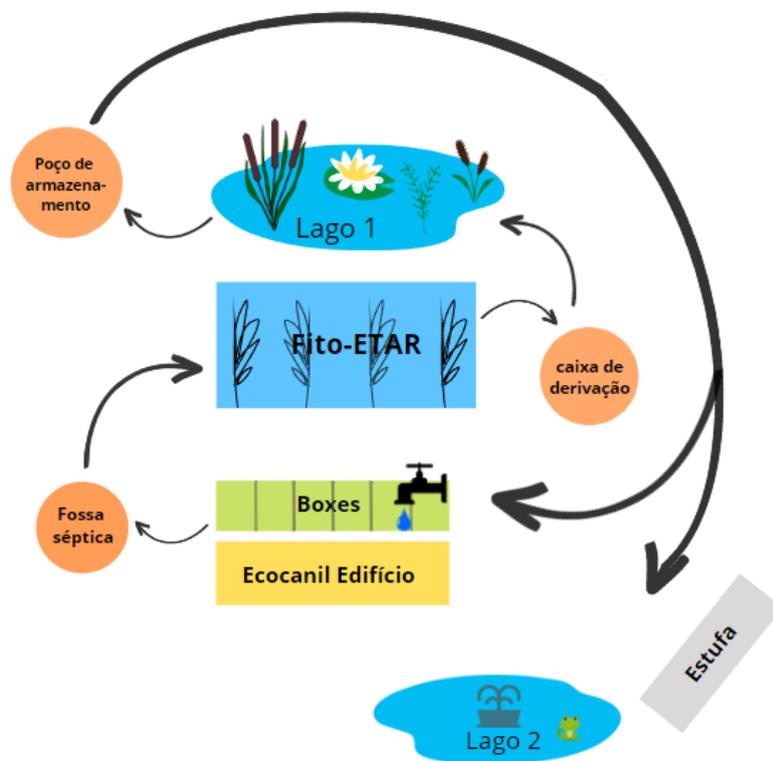


Figura 3.4 - Esquema ilustrativo do Ecocanil.

### 3.1. Espécies utilizadas

No local de estudo foram implementadas três grupos de macrófitas dominantes: Plantas Emersas, Plantas Flutuantes e Plantas Submersas (Canais Seco et al., 2008; Dias, 2020; Mendes, 2010).

Na Fito-ETAR encontra-se apenas uma macrófita emergente, a espécie *Phragmites australis* (Figura 3.5), conhecida como caniço. Esta espécie pode ser encontrada nas margens de rios, lagos e zonas alagadas. Está presente em todo o país, mas mais particularmente nas bacias do rio Tejo e Sado. É caracterizada por possuir um rizoma longo, onde pode haver multiplicação, e os talos aéreos podem atingir até 4 metros de altura (Catarino et al., 2001).

A sua floração acontece entre julho e setembro, no fim deste período, toda a parte aérea da planta começa a entrar em senescência, podendo-se observar a secagem das folhas, até um novo ciclo vegetativo, o qual tem início entre os meses de abril e maio (Oliveira, 2007). As suas folhas apresentam uma coloração verde-acinzentadas (Köbbing et al., 2013; Catarino et al., 2001).



Figura 3.5 - *Phragmites australis*.

No lago 1, podem-se observar espécies as seguintes espécies:

#### Plantas emergentes

- *Typha latifolia*, conhecida como tábua larga é uma planta aquática ou semi-terrestre (Figura 3.6). É uma espécie autóctone, encontrada principalmente nas regiões Norte e Centro, mais especificamente em margens de cursos de água, lagos e terrenos pantanosos. Esta espécie pode atingir os 2 m de altura, com folhas basais e dísticas, as flores são unissexuais em forma de espiga cilíndrica, a época de floração é de junho a agosto (Belloni et al., 2018; Rodrigues, 2021). Esta macrófita possui uma grande tolerância a altas concentrações de metais tóxicos nos seus tecidos, apresentando uma grande capacidade de absorção e uma boa capacidade de filtração (Belloni et al., 2018).



Figura 3.6 - *Typha latifolia*.

- *Iris pseudacorus*, conhecida como lírio amarelo dos pântanos (Figura 3.7), é encontrada na margem de cursos de água, lagos e zonas pantanosas. Esta macrófita pode atingir os 150 cm de altura, enquanto as suas raízes podem chegar até aos 20 cm. A época de floração é de abril a junho, as flores apresentam uma tonalidade amarela viva ou pálida. É muito usada também como uma planta ornamental (Rodrigues, 2021; Sutherland, 2009). Estudos mostram que esta espécie é capaz de viver em condições anóxicas, possuindo capacidade de redução de carga orgânica e bacteriana em 25% ao longo de um ano (Sutherland, 2009).



Figura 3.7 - *Iris pseudacorus*.

- *Juncus effusus*, (Figura 3.8) é uma planta perene, encontrada por todo o país, em locais húmidos como pântanos e lagos. Contudo, também pode aparecer em solos secos. Esta espécie prefere solos profundos, e adapta-se bem a água doce, salgada ou salobra. Os seus caules esverdeados podem chegar até os 150 cm de altura (Oliveira, 2007). A flor é um género de cápsula, ovoide a globoso. A sua época de floração é de maio a setembro (Catarino et al., 2001). O *Juncus effusus* apresenta uma tolerância a ambientes contaminados por metais tóxicos e um potencial de bioacumulação para Zn, Fe e Mn (Belloni et al., 2018).



Figura 3.8 – *Juncus effusus* (Jardim Botânico UTAD | Flora Digital de Portugal, n.d.)

- *Lythrum salicaria*, conhecida como salgueirinha (Figura 3.9), pode ser encontrada em leitos secos ou em margens de linhas de água por todo continente. Esta espécie pode alcançar os 3.5 metros de altura. Com floração de junho a agosto, as cores das flores são

geralmente magentas. É conhecida pelas suas propriedades medicinais, para tratamento de diarreia, hemorroidas, eczemas, etc. Apresenta também efeitos antioxidantes, antimicrobianos e hipoglicémicas (Mullin, 1998; Tunalier et al., 2007).



Figura 3.9 - *Lythrum salicaria* (Jardim Botânico UTAD | Flora Digital de Portugal, n.d.)

- *Mentha aquatica*, de nome comum hortelã-da-água (Figura 3.10), encontra-se nos leitos ou margens de rios por quase todo o continente português. Apresenta um cheiro muito intenso e característico. É uma espécie medicinal, tem a capacidade de retirar do meio que se encontra e acumular metais como o cádmio, crómio e níquel, nas suas raízes. A época de floração é de julho a outubro (Baudh et al., 2017).



Figura 3.10 - *Mentha aquática* (Jardim Botânico UTAD | Flora Digital de Portugal, n.d.)

#### Plantas flutuantes:

- *Nymphaea alba* é uma espécie ornamental, conhecida como figos-de-rio (Figura 3.11). Pode ser encontrada em charcos, lagoas, águas doces e estagnadas. A sua época de

floração é de março a outubro. A sua flor flutua na superfície da água e pode atingir os 20 cm, enquanto a sua folha verde pode chegar aos 30 cm (Lakshmi et al., 2013).



Figura 3.11 - *Nymphaea alba*.

Plantas submersas:

- *Myriophyllum spicatum* (Figura 3.12), é uma espécie que se pode encontrar nas regiões da Bacia do Baixo e Alto Douro, Beira Litoral, Ribatejo e Alentejo. É uma macrófita aquática de cursos de água com pouca corrente, charcos e lagos ou estagnadas. Planta robusta com um rizoma horizontal rastejante, o seu caule comprido pode atingir os 3 m de comprimento. Inflorescência uma espiga emergente. A sua floração vai de julho a setembro (Catarino et al., 2001).



Figura 3.12 - *Myriophyllum spicatum*

Estas espécies, para além de serem plantas decorativas, apresentam também a capacidade de absorver e acumular metais retirando-os da água, possuem resistência a pragas, apresentam capacidades medicinais, de filtração de nutrientes e fornecem, também, refúgio a certas espécies

animais, como anfíbios. Algumas espécies, como a *Mentha aquática*, são muito importantes pois, devido ao seu cheiro intenso atraem muitos insetos polinizadores sendo muito benéfico para o ecossistema onde se inserem (Dias, 2020).

### 3.2. Contexto climático

Neste ponto dá-se destaque a dois parâmetros de especial interesse, que se escolheram por poderem ter influência no caudal e eficiência da fito-ETAR: temperatura e precipitação. Para isso, foram analisados dados dos últimos 30 anos tanto da temperatura como da precipitação e também os dados relativos ao último ano, 2021/2022 na região Norte, tendo em conta a localização da fito-ETAR em estudo.

#### ❖ Dados dos últimos 30 anos

##### Temperatura

Na Figura 3.13 é possível observar, numa escala de cores, a temperatura média de 30 anos na região Norte de Portugal, a qual varia entre os 11 e 12°C.

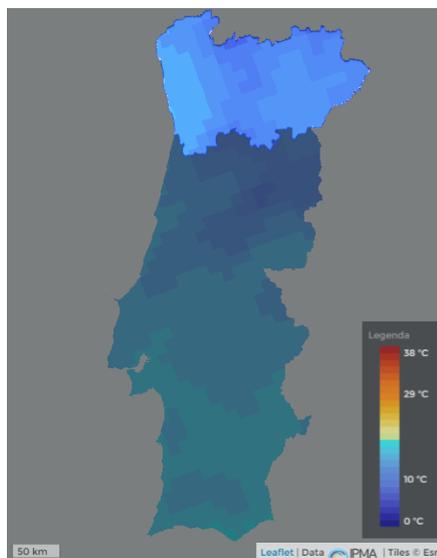


Figura 3.13 - Temperatura média de 30 anos na região Norte. Fonte: Portal do clima (jun. 2022)

(<http://portaldoclima.pt/pt/>)

A Figura 3.14 apresenta a temperatura média de 30 anos (1971 – 2000) e revela que esta tem vindo a aumentar, sendo os meses de maior calor entre julho e agosto.

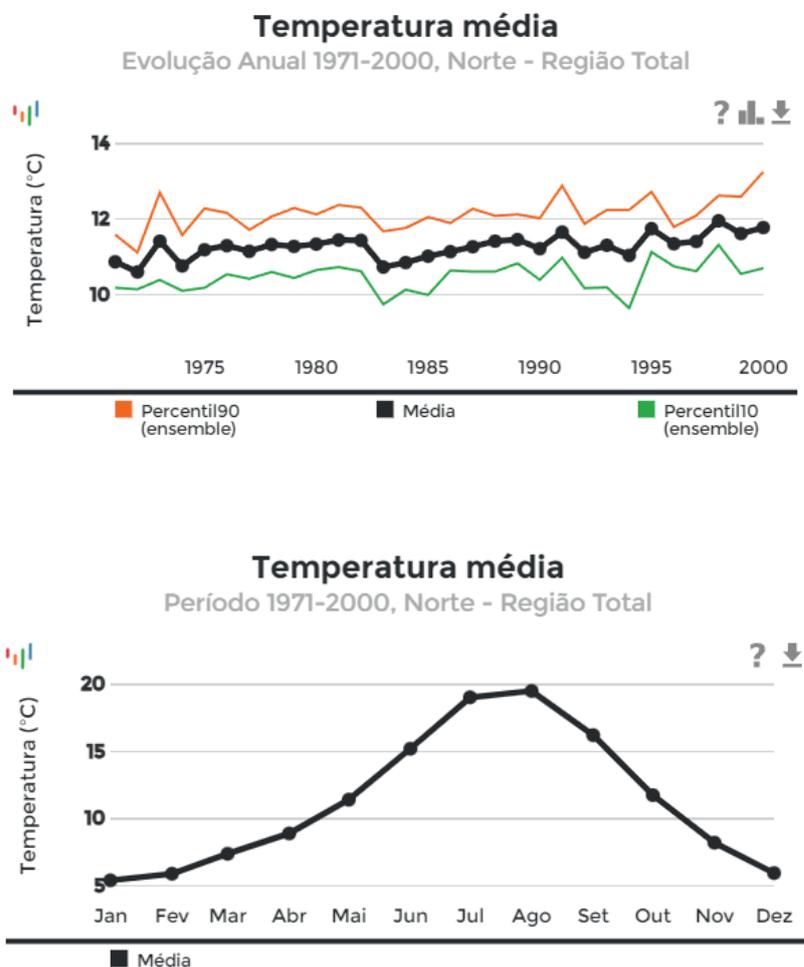


Figura 3.14 - Variação da temperatura média da região Norte de 1971 a 2000. Fonte: Portal do clima (jun. 2022).

### Precipitação

A Figura 3.15 representa a precipitação média de uma série de 30 anos na região Norte de Portugal. A zona de Braga (Amares), evidencia uma precipitação média até o ano 2000 de 2700 mm.

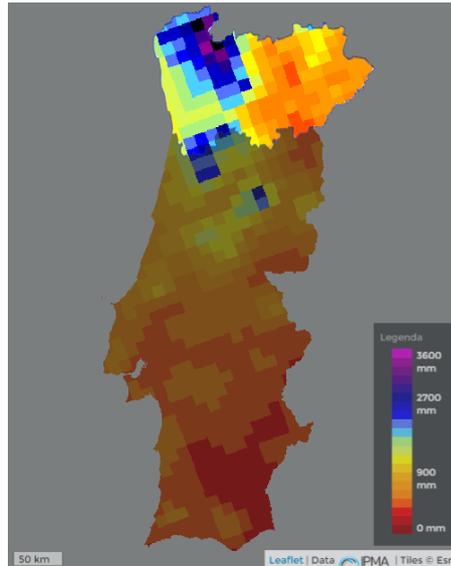


Figura 3.15 - Precipitação média de 30 anos. Fonte: Portal do clima (jun. 2022).

É possível observar na Figura 3.16, que o ano mais chuvoso foi 1994 e os meses mais chuvosos são de novembro a janeiro.

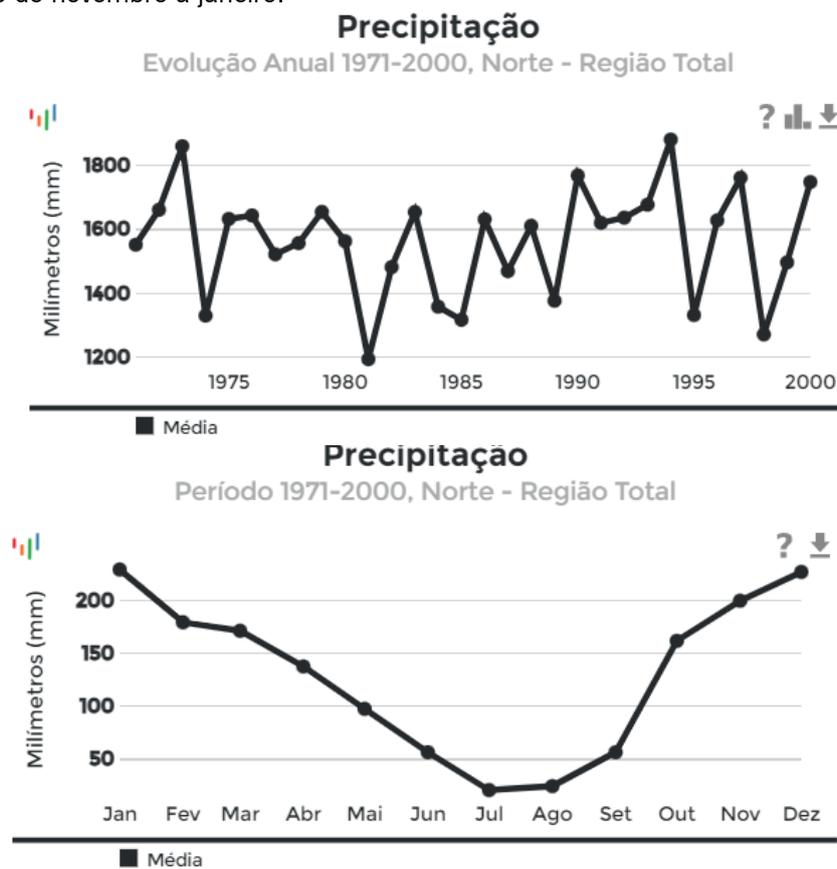


Figura 3.16 - Variação da precipitação média da região Norte de 1971 a 2000. Fonte: Portal do clima (jun.2022).

❖ Dados do último ano (2021/2022)

Os dados do último ano são relativos à estação meteorológica localizada no concelho de Barcelos (04F/01C), distrito de Braga, na bacia hidrográfica do Cávado/ Ribeiras Costeiras, com uma altitude de 36m e de coordenadas (X; Y) 159004;506433.

### Temperatura

Conforme apresentado na Figura 3.17, a temperatura média mensal variou entre os 9°C, em janeiro e os 21°C, em julho e agosto, no último ano. Enquanto a temperatura máxima mensal variou entre os 11°C, em janeiro e os 23°C, em julho.

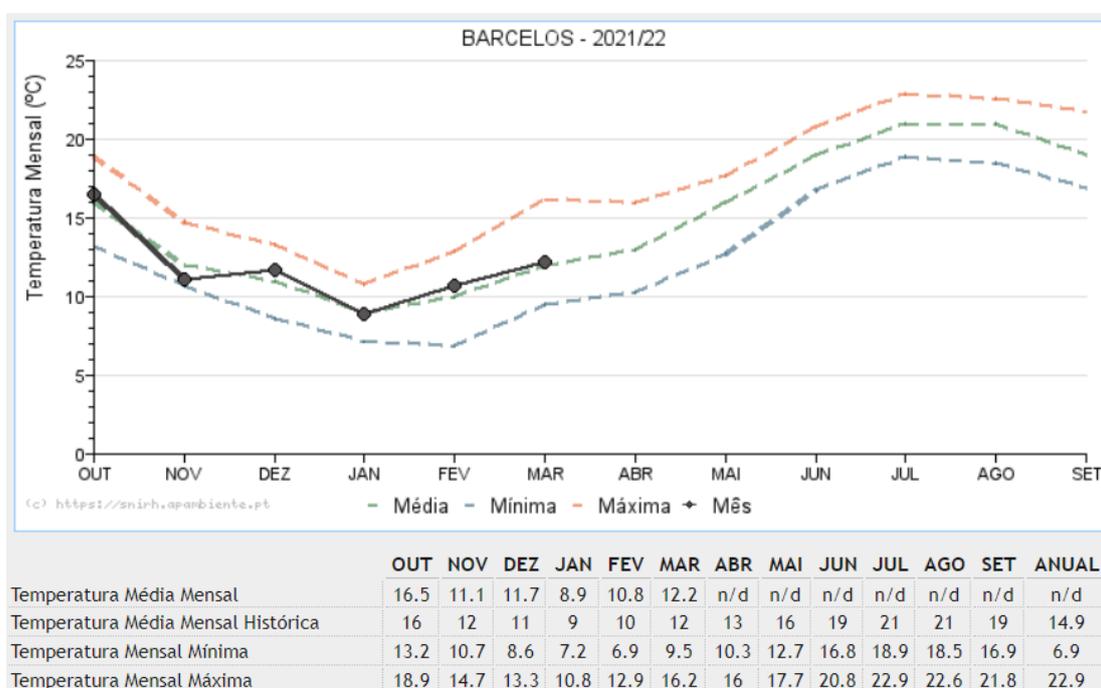


Figura 3.17 - Temperatura mensal, média, mínima e máxima da estação de Barcelos no ano 2021/2022.

Fonte: SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (mar. 2022) (<http://snirh.pt>).

### Precipitação

É possível observar, através da análise da Figura 3.18, que os meses mais chuvosos são de novembro a março, o que indica que potencialmente poderá haver um aumento do caudal da fito-ETAR nesta época. Os meses menos chuvosos vão de abril a setembro.

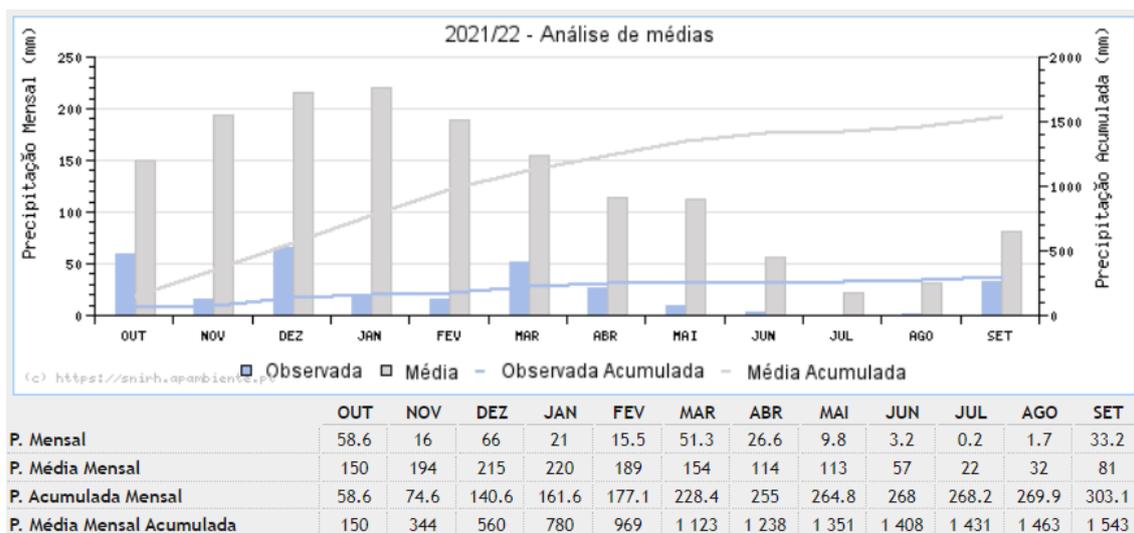


Figura 3.18 - Precipitação mensal, média e observada acumulada e média acumulada, da estação de Barcelos, no ano 2021/2022. Fonte: SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (set.2022) (<http://snirh.pt>).

## 4. Materiais e métodos

### 4.1. Definição do plano de monitorização

A definição de um plano de monitorização é crucial, de forma a garantir a segurança em projetos de reutilização de água. Os planos de monitorização podem ser incluídos em três grupos: Monitorização de validação, Monitorização de desempenho ou operacional e Monitorização de conformidade (Rebello e Franco, 2019). Neste trabalho será realizada uma monitorização de desempenho.

Foi também necessária a escolha de pontos críticos de controlo para recolha de água (Figura 4.1).

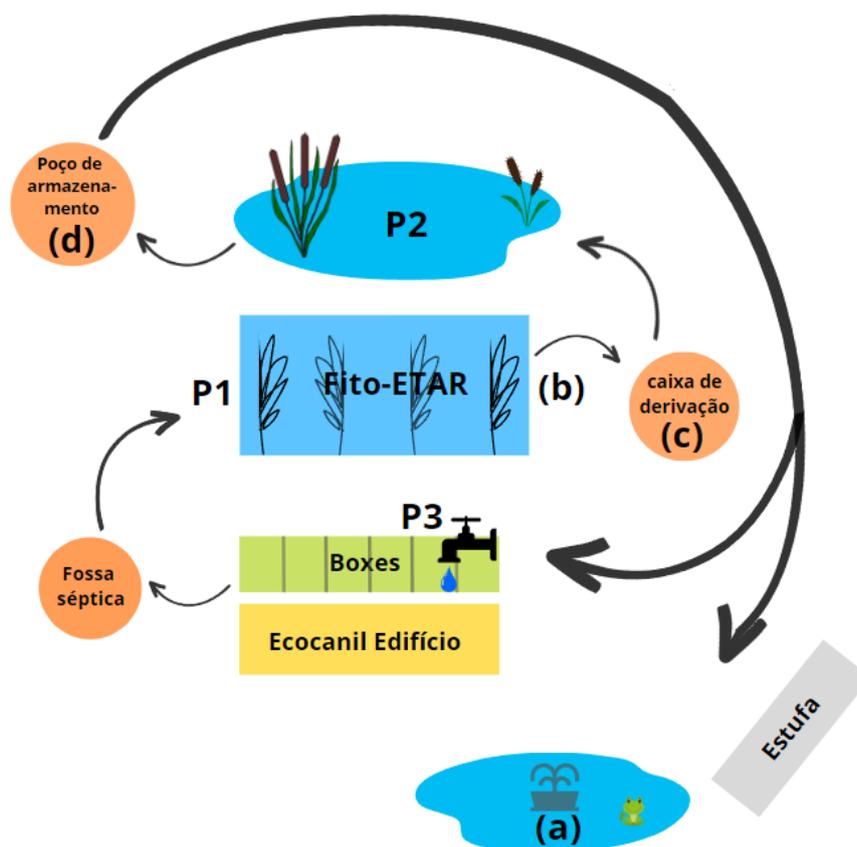


Figura 4.1 - Esquema ilustrativo dos pontos de controlo e monitorização no Ecocanil. P1 Fito-ETAR; P2 Lago; P3 Torneira; a - Lago do chafariz (LC); b - Fim da fito-ETAR (FFE); c - Caixa de derivação (CD); d - Poço de armazenamento da água (PA).

Os pontos a, b, c e d são apenas pontos de monitorização de parâmetros medidos “*in situ*”, enquanto os pontos P1, P2 e P3, são também pontos de amostragem (medição e colheita de amostras).

Tabela 4.1 - Parâmetros a analisar “*in situ*” e em laboratório. CE – condutividade elétrica.

Parâmetros a analisar	
<u>"In situ"</u>	<u>Laboratório</u>
pH	SST
Temperatura	Alcalinidade
CE	Turbidez
Oxigénio dissolvido	CQO
Salinidade	Fosfatos
TDS	Nitratos
Eh	Cloretos
Cor	Sulfatos
Cheiro	SAR
	EPT

Foram colhidas três amostras (nos locais P1, P2, P3) mensalmente durante um período de cinco meses. A escolha do ponto P1 era inicialmente para ser a fossa séptica, pois é o local onde ocorre o primeiro tratamento do afluente (separação dos sólidos em suspensão). Contudo, devido ao difícil acesso, foi escolhido o local mais próximo a este, onde o afluente sai da fossa séptica e entra na fito-ETAR.

O ponto P2, o lago, foi escolhido devido ao efluente já ter passado pelo tratamento na fito-ETAR e por este ser também um outro local de tratamento por fitorremediação.

O ponto P3 (a torneira) que se encontra no local das boxes do ecocanil, era sem dúvida um ponto a ser analisado, pois é onde a água já depurada volta a ser reutilizada.

## 4.2. Trabalho de campo

O trabalho de campo focou-se na realização de cinco campanhas, que tiveram início no mês de março e terminaram em julho. Para a realização das mesmas foi necessário equipamento

multiparamétrico e material específico para recolha das amostras (Figura 4.2), que consistiu na colheita de água em três locais distintos: P1, P2 e P3 (Figura 4.3).

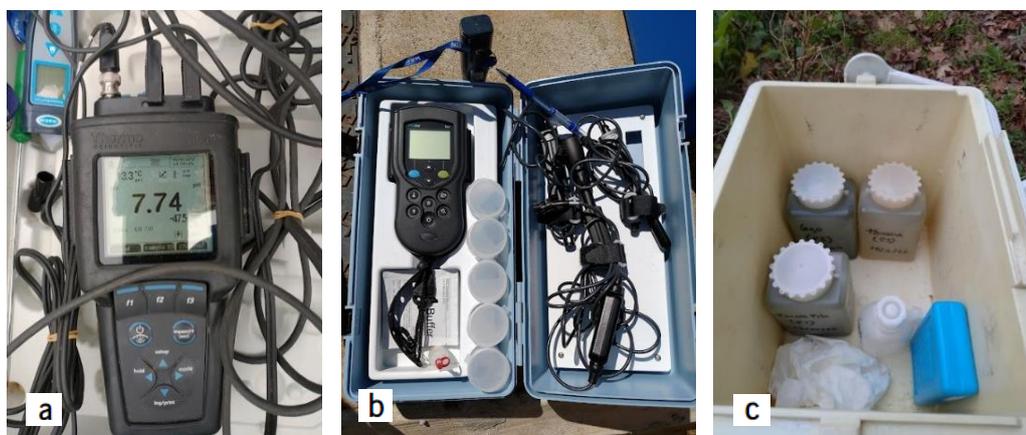


Figura 4.2 - Equipamento necessário para as análises “*in situ*” e amostragem. (a) Medidor multiparamétrico portátil Thermo Scientific Orion; (b) Medidor multiparamétrico portátil HACH HQ30d flexi; (c) Material necessário para a amostragem.



Figura 4.3 – a - Início da Fito-ETAR (P1); b - Lago (P2); c – Torneira (P3).

Para uma melhor monitorização de todo o sistema implementado, procedeu-se à análise “*in situ*” de outros quatro pontos, nomeadamente, lago com chafariz o qual recebe água já tratada pela fito-ETAR (LC); fim da Fito-ETAR (FFE); caixa de derivação da fito-ETAR (CD) onde a água passa antes de entrar no lago, e poço de armazenamento (PA) onde, como o nome indica, a água permanece até necessária utilização (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Locais de medição de parâmetros “in situ” (a) LC; (b) FFE; (c) CD; (d) PA.

Após a análise de todos os parâmetros definidos colheu-se em cada local escolhido, 1 L de amostra em frascos de polietileno de alta densidade (frascos Kartel).

Os recipientes de amostragem foram previamente identificados com o nome do local amostrado e a data da campanha, de acordo com a norma ASTM 5245 (ASTM, 1998).

Posteriormente as amostras foram guardadas em condições de refrigeração, protegidas da luz solar e levadas imediatamente para o laboratório.

### 4.3. Trabalho laboratorial

A Tabela 4.2 resume os métodos analíticos usados na presente dissertação, com vista a descrever as propriedades da água.

Tabela 4.2 - Métodos analíticos usados para descrever as propriedades da água. (ICP-MS= espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente; CI= cromatografia iônica).

Parâmetros	Técnicas	Métodos de referência (AWWA, 1992)
<b>Análise de aniões</b>		
Fluoreto	CI	S-9 (Metrohm, 2000)
Cloreto	CI	S-9 (Metrohm, 2000)
Nitrito	CI	S-9 (Metrohm, 2000)
Brometo	CI	S-9 (Metrohm, 2000)
Nitrato	CI	S-9 (Metrohm, 2000)
Fosfato	CI	S-9 (Metrohm, 2000)
Sulfato	CI	S-9 (Metrohm, 2000)
Amônio	CI	S-9 (Metrohm, 2000)
Metais	ICP-MS	Standard Methods 3113 B
<b>Análise de outros parâmetros</b>		
Alcalinidade	Volumetria	Standard Methods 2320 B
SST	Gravimetria	Standard Methods 2540 D
Turbidez	Turbidimetria	Standard 4500-SO4-2 E
CQO	Fotometria	EPA Method 410.4

O trabalho laboratorial teve início em abril de 2022. Para a preparação das amostras foi necessário filtrá-las (Figura 4.5), devido às partículas de grandes dimensões em suspensão. Utilizou-se, portanto, membranas de 0.45 µm de nitrato de celulose.

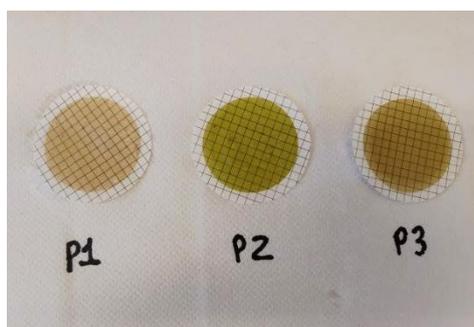


Figura 4.5 - Processo de filtração das amostras em laboratório.

No decorrer da filtração observou-se, principalmente nas amostras P1 e P2, um impasse na filtração das águas devido às partículas retidas na membrana. Para estas amostras, foi então necessário trocar as mesmas mais regularmente (Figura 4.6).



Figura 4.6 - Impasse na filtração devido às partículas retidas nas membranas.

Após a filtração, cada amostra foi vertida para dois recipientes de 50 mL, uma para análise de aniões e outra para a análise de elementos potencialmente tóxicos (Figura 4.7). Para estes últimos, foram acidificados com HNO<sub>3</sub>, 65 % *suprapur* Merck, no sentido de preservar a amostra a um pH inferior a 2 (Standard Methods 3010B). Este procedimento só foi aplicado para as amostras da primeira e quarta campanha.

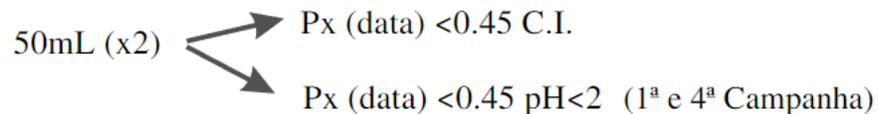


Figura 4.7 - Esquema de identificação das amostras.

### Alcalinidade

A alcalinidade representa a capacidade de tamponamento do sistema água, ou seja, a quantidade dos iões carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e hidróxido (OH) presentes na água, face a mudanças do pH (Figura 4.8).

Para o cálculo da alcalinidade utilizou-se a seguinte equação:

$$A_T = \frac{(V_2 \times C_{HCL} \times M_{CaCO_3} \times 1000)}{V_{amostra}}$$

Onde:

- $A_T$  Alcalinidade total – mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$   
 $V_2$  Volume de ácido consumido até o ponto final de titulação – mL  
 $C_{\text{HCL}}$  Concentração da solução do ácido HCL (titulante) –  $\text{n}^\circ\text{eq}/\text{L}$   
 $M_{\text{CaCO}_3}$  Massa molar do carbonato de cálcio – g/mol  
1000 Fator de conversão entre unidade de g para mg – mg/g  
 $V_{\text{amostra}}$  Volume da amostra – mL



Figura 4.8 - Procedimentos realizados para a análise da alcalinidade.

O diagrama de Piper foi aplicado para classificar os diferentes tipos de água, com vista à determinação da sua qualidade. Para a sua elaboração, foi utilizado o software QualiGraf versão 1.1.

### Aniões

A cromatografia iónica é uma técnica que consiste na separação dos componentes de uma mistura entre o eluente (fase móvel) e um adsorvente (fase estacionária). Para a análise das propriedades da água, utilizou-se como tipo de suporte, a cromatografia por coluna. Foram analisados os seguintes aniões: Fluoreto; Cloreto; Nitrito; Brometo; Nitrato; Fosfato; Sulfato (Figura 4.9).

Para a análise dos aniões as amostras foram preservadas e filtradas a uma pressão reduzida com uma membrana de  $0,45 \mu\text{m}$  e refrigeração a  $4^\circ\text{C}$ . A amostra P1 de março apesar

de filtrada anteriormente, apresentava turvação e um resíduo negro, foi então necessário filtrar novamente com membrana 0,45 µm para se proceder com a análise.

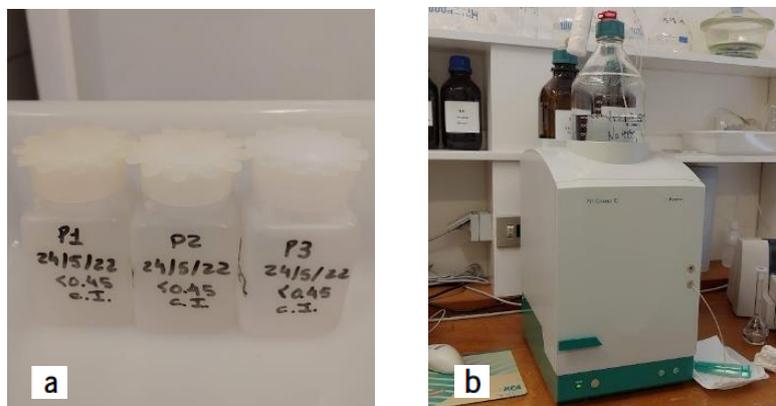


Figura 4.9 - (a) Amostras já filtradas e preparadas para a C.I.; (b) Processo da C.I.

#### Carência química de oxigênio (CQO)

O CQO é um parâmetro importante a ser analisado na reutilização da água, pois permite detetar os níveis de matéria orgânica e inorgânica presentes nas amostras, e também quantificar a percentagem de remoção do mesmo. Este parâmetro foi analisado na empresa PhytoClean, através do equipamento da marca Hanna instruments (Figura 4.10). Na medição do mesmo, foi utilizada a gama média de 0 a 1500 mg/L e respetivos reagentes.

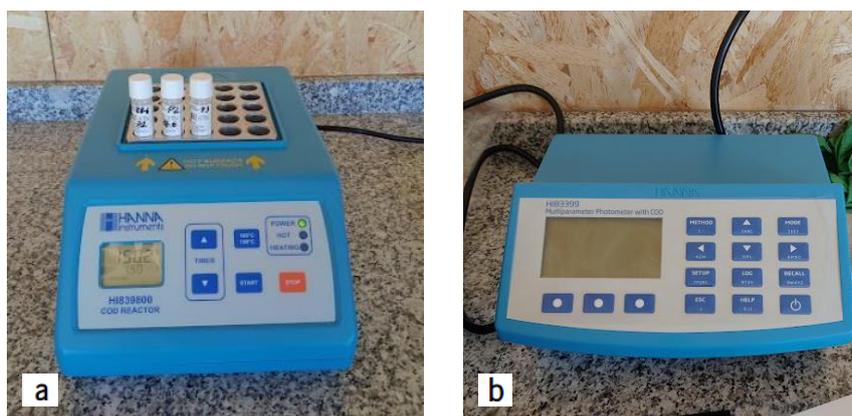


Figura 4.10 - (a) Reator HI839800 para CQO; (b) Fotómetro Multiparamétrico HI83399 para CQO.

A análise de CQO consiste primeiramente em adicionar 2mL de cada amostra de água ao respetivo recipiente que contém o reagente (HI93754B-25) e agitar o seu conteúdo até este ficar homogêneo. Os frascos são identificados para as amostras não serem trocadas (Figura 4.11). De

seguida, estas passam por um processo de aquecimento durante 2 horas a 150°C, no reator (Figura 4.10 - a). Findando o tempo referido, as amostras são retiradas do reator e agitadas mais uma vez. Por último, e após arrefecimento até à temperatura ambiente, são inseridas no fotómetro (Figura 4.10 - b).



Figura 4.11 - Amostras antes de serem aquecidas no reator.

### Turbidez

Para a análise da turbidez da água foi utilizado um turbidímetro, apresentado na Figura 4.12.

Como se trata de um processo muito instável, devido às partículas em suspensão se depositarem muito rapidamente, foram efetuadas três réplicas e uma média dos três valores.



Figura 4.12 - Turbidímetro TB1000.

### Sólidos suspensos totais (SST)

Os SST foram analisados através da secagem dos sólidos suspensos que ficaram retidos nos filtros de microfibras de vidro (Figura 4.13). Inicialmente foi necessário a preparação dos filtros de vidro, processo este que consiste na lavagem dos mesmos, secagem e pesagem até que

apresentem sempre o mesmo valor. De seguida, determinado o volume da amostra, dependendo do material suspenso, foram filtrados para que os sólidos suspensos ficassem retidos no filtro. Depois as amostras são levadas a secar a 105°C até peso constante, para quantificação do peso, já com os sólidos suspensos retidos no filtro de vidro. Para tal, utilizou-se a seguinte equação:

$$SST = \frac{(m_2 - m_t)}{v_{amostra}}$$

Onde:

SST Sólidos suspensos totais – g/L

$m_2$  Massa da cápsula, filtro e amostra – g

$m_t$  Massa da cápsula e filtro – g

$V_{amostras}$  Volume da amostra – L



Figura 4.13 – Imagens ilustrativas do procedimento para a análise dos SST.

## SAR

O SAR, Razão de Adsorção de Sódio, é um parâmetro de elevada importância para a classificação da água para fins de irrigação. Para o tratamento gráfico foi utilizado o software QualiGraf versão 1.1.

Este parâmetro é uma razão que indica a percentagem de sódio presente na água e pode ser calculado através da seguinte equação:

$$SAR = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{r(Ca^{+2} + Mg^{+2})}{2}}}$$

## Elementos Potencialmente Tóxicos

Para a análise dos EPT, como o mercúrio (Hg), o chumbo (Pb), o cádmio (Cd) e o Arsênio (As), as amostras foram acidificadas com HNO<sub>3</sub>, 65 % *suprapur* Merck, de forma a preservar os seus constituintes a um pH inferior a 2 (Standard Methods 3010B). As amostras da primeira e quarta campanha foram analisadas por ICP-MS (espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente) (Actlabs, Ontário, Canadá).

### **4.4. Estágio na PhytoClean**

A PhytoClean é uma spin-off da Universidade do Minho, que se dedica maioritariamente à produção de plantas aquáticas com características fitorremediadoras. A empresa, apresenta-se com o objetivo de contribuir para um futuro mais sustentável e ecológico, através do tratamento de águas e solos contaminados com o recurso a plantas. Desta forma, pretende evitar a necessidade de utilização de químicos, muitas vezes prejudiciais ao Homem e à Natureza. Como apenas trabalham com espécies autóctones, promovem ainda o bem-estar dos ecossistemas envolventes.

Este tipo de plantas, selecionadas criteriosamente para cada caso, exibem diversas aplicações, nomeadamente no que diz respeito ao tratamento de águas em piscinas, lagos, efluentes de agropecuária, indústria, pequenos aldeamentos e na recuperação e reabilitação de áreas degradadas, entre outros.

O estágio na PhytoClean teve início no dia 12 de janeiro de 2022 e terminou no dia 2 de junho de 2022. Aqui foram atribuídas diversas tarefas como a preparação, monitorização e avaliação das diferentes condições a que as espécies vegetais estavam sujeitas no local de produção; inserção em projetos da empresa, nomeadamente aqueles vocacionados para a reutilização de água em contexto de economia circular; realização de análises aos efluentes; estudo de diferentes tipos de substratos a serem aplicados nos diversos sistemas de tratamentos, entre outros. O objetivo do estágio passou, também, pela aplicação dos conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do percurso académico.

O tratamento de algumas das plantas aquáticas, como *Mentha aquatica*, *Cardamine sp.*, *Cyperus sp.*, *Iris pseudacorus*, *Juncos sp.*, *Nymphaea sp.* e a manutenção das mesmas, pode ser visualizado através da Figura 4.14.



Figura 4.14 - Representação da manutenção de várias espécies de plantas aquáticas.

Durante este período foi também feita a divisão da espécie *Phragmites australis* (Figura 4.15), o que auxiliou na aquisição de uma maior compreensão do seu ciclo de vida e da sua capacidade de multiplicação. Esta espécie foi um dos “elementos-chave” para este trabalho de dissertação, devido à sua aplicação na fito-ETAR em estudo, e à sua elevada capacidade depuradora.

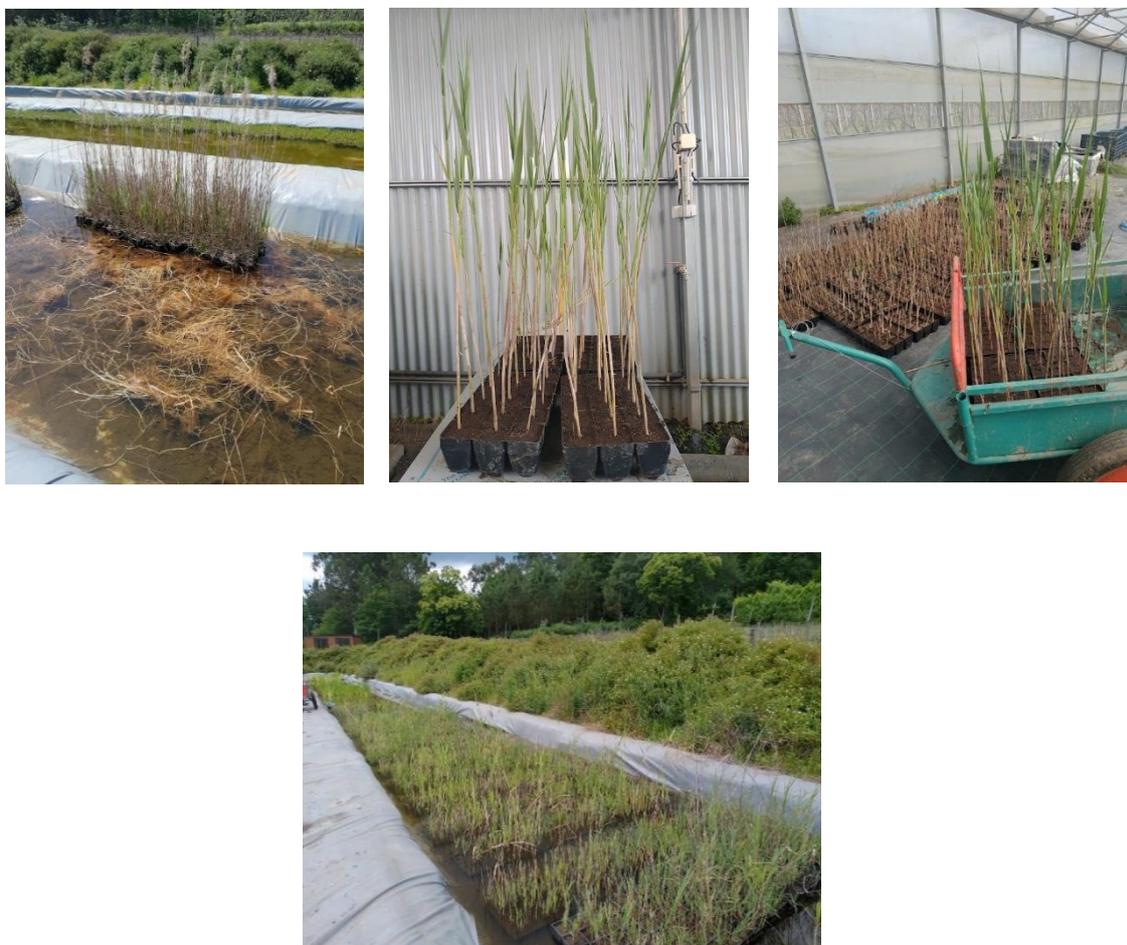


Figura 4.15 – Multiplicação vegetativa da espécie *Phragmites australis*, inserida numa zona húmida artificial (PhytoClean).

Os lugares que albergam grande parte das espécies aquáticas na empresa, e apelidadas aqui como “charcas”, são nada mais nada menos que ZHA, recriando o ambiente natural da sua produção. Desta forma, o aumento da biodiversidade deste local bem como o fornecimento de habitats para a vida animal, promove sobremaneira, o desenvolvimento da vida selvagem, sendo também um indicador da qualidade da água. Ao longo do período de estágio, foram inúmeras as espécies observadas, tanto nestas ZHA, como na proximidade das mesmas (Figura 4.16).



Figura 4.16 - Biodiversidade observada na PhytoClean.

## 5. Resultados e discussão

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos ao longo do trabalho. Estes, fundamentalmente de natureza hidroquímica, foram sujeitos a avaliação e discussão, de forma a perspetivar a possível reutilização, nomeadamente para irrigação, em função da qualidade da água tratada.

### 5.1. Propriedades hidroquímicas – conformidade legal

De forma a avaliar a conformidade, ou não, da utilização do afluente tratado para rega, fomentando o conceito de economia circular, são apresentados na Tabela 5.1, os resultados dos parâmetros analisados em campo. As propriedades físico-químicas avaliadas contemplaram três pontos de amostragem (P1, P2, P3), tendo sido complementados com outros quatro pontos de monitorização: lago chafariz (LC), fim da Fito-ETAR (FFE), caixa de derivação (CD) e poço de armazenamento (PA). Os primeiros pretendem avaliar a viabilidade do tratamento em si, por fitorremediação, onde o ponto P1 e P2 refletem as zonas de tratamento por plantas. O ponto P3, último local do circuito - torneira, é referente à água já tratada, onde deverá ser reutilizada. Os pontos de monitorização, tal como o nome indica, permitiram auxiliar na perceção do sistema como um todo. Os resultados destes parâmetros, obtidos no espaço do EcoCanil, são relativos às cinco campanhas realizadas entre os meses de março e julho de 2022. Estes resultados têm por base a legislação já referida no ponto 2.2.1 (Tabelas 2.1 e 2.2), relativo aos valores de descarga e reutilização das águas residuais em Portugal.

Tabela 5.1 - Resultados dos parâmetros analisados “*in situ*” dos pontos de amostragem P1, P2, P3 e dos pontos de monitorização, lago chafariz (LC), fundo da Fito-ETAR (FFE), caixa de derivação (CD) e poço de armazenamento (PA). O VMR e VMA correspondem ao DL 236/98, referente à qualidade de águas destinadas à rega.

Campanhas	Pontos de amostragem	Parâmetros								
		pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	O <sub>2</sub> (mg/L)	TDS (mg/L)	Salinidade (%)	Cor	Cheiro	Eh (mv)
mar/22	P1	7,03	1115	14,1	0,83	547	0,59	acastanhada	muito	-210
	P2	8,34	953,9	16,5	18,3	467,9	0,51	esverdeada	nenhum	-7
	P3	7,77	952,4	13,2	2,5	467,2	0,5	esverdeada	-	-23
	LC	9,42	333,9	17,1	24,71	164,1	0,208	esverdeada	pouco	48
	FFE	7,42	904	13,4	0,46	443,5	0,485	acastanhada	pouco	-198
	CD	6,97	1360	11,4	0,25	668,1	0,71	limpida	nenhum	-228
	PA	8,35	961,3	15,7	17,13	471,6	0,517	esverdeada	nenhum	13
abr/22	P1	7,26	857	15,5	0,14	420	0,42	castanha	pouco	-227
	P2	7,59	890	23,7	0,75	437	0,44	esverdeada	nenhum	-32
	P3	7,64	899	22,5	0,28	441	0,44	esverdeada	nenhum	-176
	LC	9,37	377	21,4	15,22	180,5	0,18	esverdeada	nenhum	-12
	FFE	7,08	758	20,8	4,49	353	0,35	esverdeada	nenhum	-88
	CD	6,73	1595	14	0,41	759	0,76	limpida	nenhum	-197
	PA	7,96	915	16,5	0,4	449	0,45	esverdeada	nenhum	-
mai/22	P1	7,05	500	20,7	4,36	241	0,24	acastanhada	pouco	83
	P2	7,79	1073	21,6	13,66	528	0,53	esverdeada	nenhum	137
	P3	7,38	1135	22,5	0,62	533	0,53	acastanhada	pouco	-74
	LC	9,23	343	23,3	13,15	157	0,16	turva	nenhum	105
	FFE	7,45	915	19,5	0,9	448	0,45	turva	nenhum	-128
	CD	6,8	1351	17,4	0,34	669	0,66	limpida	pouco	-111
	PA	8,11	937	20,7	0,3	439	0,44	limpida	nenhum	114
jun/22	P1	6,81	1142	20,5	0,29	557	0,56	castanha	muito	-68
	P2	7,99	1109	25,1	6,47	537	0,54	acastanhada	nenhum	75
	P3	7,53	994	21,3	0,17	484	0,48	limpida	pouco	-53
	LC	7,79	490	25,8	4,93	234	0,23	esverdeada	nenhum	109
	FFE	7,94	1086	22,4	1,24	529	0,53	acastanhada	pouco	-139
	CD	6,82	1219	18,6	0,22	664	0,67	acastanhada	pouco	-131
	PA	8,01	935	18,4	0,15	454	0,46	limpida	nenhum	-60
jul/22	P1	7,1	1086	28,5	0,3	529	0,53	castanha	muito	-96
	P2	7,53	952	28,8	21,41	462	0,46	esverdeada	nenhum	143
	P3	7,82	1047	24,7	0,65	509	0,51	esverdeada	pouco	-14
	LC	9,13	441	29,8	9,7	211,4	0,21	esverdeada	nenhum	112
	FFE	7,31	1249	26,3	2,44	611	0,61	turva	nenhum	-32
	CD	6,9	1583	23,3	0,34	781	0,79	limpida	nenhum	-130
	PA	8,03	823	25,7	1,05	398	0,4	turva	nenhum	-37
	<b>VMR</b>	6,5-8,4	1000	-	5,78*	640	-	-	-	-
	<b>VMA</b>	4,5-9,0	-	-	-	-	-	-	-	-

\* valor correspondente ao Anexo XV Qualidade das águas balneares do DL 236/98.

Através da análise da tabela é possível observar que o ponto LC - 1ª campanha, apresenta o valor de pH mais elevado (9,42), sendo o ponto de amostragem P1, em junho, referente ao valor mais baixo, com 6,81. Os resultados demonstram que ao longo das campanhas houve uma tendência para que estes pontos fossem os locais com os maiores e menores valores de pH.

No que diz respeito à CE, esta demonstra alguma variabilidade, sendo o valor mais elevado de 1142  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , em junho no P1, e o mais baixo de 333,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , em maio no ponto C1. A CE de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na 3ª campanha (P1), apresenta-se relativamente desenquadrada quando comparada com outras no mesmo local. Este ponto, visto ser um local de amostragem primário de tratamento (início da Fito-ETAR), era frequente a elevada carga orgânica, visível aquando da amostragem (Figura 5.1).

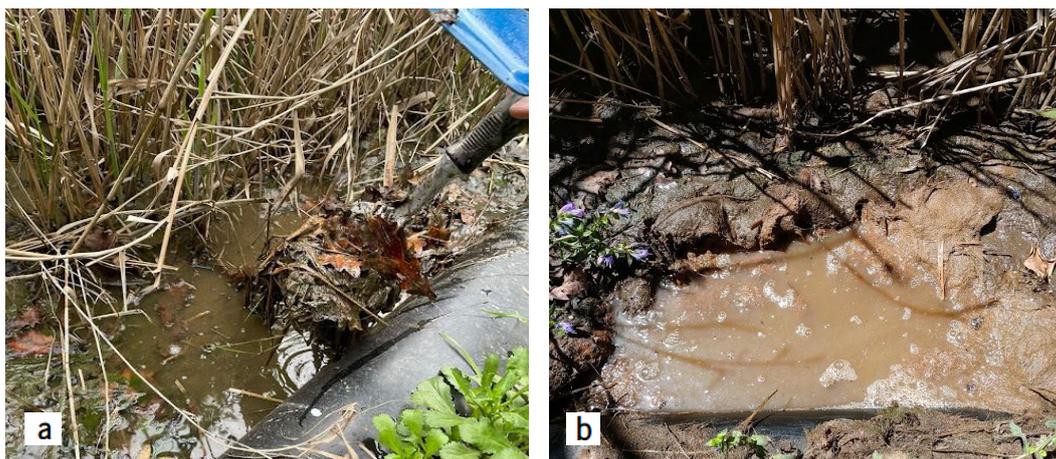


Figura 5.1 - Carga orgânica na entrada do afluente no ponto de amostragem P1. (a) Camada de matéria orgânica, 1ª campanha; (b) Dejetos de animais (4ª e 5ª campanha).

Contudo, este valor mais baixo pode estar relacionado com elevada precipitação que ocorreu dias antes da campanha e que poderá ter influenciado, através do efeito de diluição, este parâmetro (Gomes et al., 2014).

As temperaturas registadas nos locais de amostragem aparentam estar em concordância com o contexto climático do local (<http://snirh.pt>). Com valores mínimos medidos na água de 13,2°C, na primeira campanha, e um máximo de 28,8°C, na última campanha.

É de notar que o parâmetro oxigénio dissolvido é o que apresenta a maior variação entre os pontos analisados. A concentração mais alta foi de 24,71 mg/L (LC), em março, correspondendo o valor mais baixo à campanha de julho no P1, com 0,3 mg/L. De uma maneira geral, os pontos LC e P2 são os que exibem sempre valores mais elevados de O<sub>2</sub>. Este acontecimento pode dever-se ao facto de ambos representarem lagos, sendo locais de maior contacto com a atmosfera, e, portanto, um maior arejamento, apresentando influência nos resultados de oxigénio dissolvido. De salientar que o LC corresponde a um lago com chafariz, e, logo o incremento na taxa de oxigénio. Por sua vez, os locais com menores concentrações de oxigénio são aqueles que se encontram confinados, tais como o poço de armazenamento (PA) e o ponto de amostragem P3, referente ao local final por onde sai a água tratada (torneira). Entre estes, destaca-se também o ponto P1 (fito-ETAR). Aqui acredita-se que a razão não tenha que ver com o reduzido contacto com o oxigénio, mas sim com os processos bióticos inerentes à Fito-ETAR que aqui ocorrem. Um fator importante a destacar na transferência de oxigénio para o meio é a existência de plantas em decomposição. A matéria orgânica pode atuar como uma barreira, causando um decréscimo nas taxas de oxigénio no afluente (Amado, 2007). Já na rizosfera, esta molécula é muito importante na remoção de carbono orgânico e azoto, acreditando-se que, como o oxigénio é consumido rapidamente, serão criadas na matriz do solo zonas aeróbias, anaeróbias e anóxicas as quais permitem a ocorrência de reações de oxidação-redução, havendo portanto, um consumo de oxigénio (Oliveira, 2008). Contudo, devido a estas condições mais anóxicas, espécies como a *Phragmites australis*, que possuem caules ocos, são alternativas eficazes, visto que são capazes de apresentar concentrações elevadas de oxigénio no seu interior e conseqüentemente, um maior potencial para libertar o oxigénio no meio (Oliveira, 2008).

O parâmetro TDS apresenta valores semelhantes para os pontos amostrados, com exceção do ponto P1 na 3ª campanha, o qual é ligeiramente mais baixo e como seria de esperar, acompanha o valor da CE. O ponto de amostragem “caixa de derivação”, excede em todas as campanhas, o VMR de 640 mg/L. Pelo contrário, o ponto LC, que sistematicamente se apresenta com resultados mais baixos, comparativamente às restantes amostragens, apresenta o valor mais elevado de 157 mg/L, em maio de 2022.

A salinidade demonstra alguma estabilidade ao longo das campanhas, sendo o valor mínimo de 0,16%, na campanha de maio de 2022, e o máximo de 0,79%, em julho de 2022. Visto

que os efluentes a serem tratados são sempre do mesmo tipo, não existe uma elevada variação neste parâmetro.

Já a cor apresenta sempre uma concordância entre os pontos analisados. P1 possui sempre cor acastanhada, P2 uma cor mais esverdeada e o ponto P3 varia entre esverdeada a límpida. A cor límpida só acontece na campanha de junho no ponto P3. Este facto pode dever-se à maior taxa de remoção de nutrientes, reduzindo por isso, por exemplo, microalgas que estejam a dar tonalidade à água. O parâmetro cheiro, no ponto P3, não foi passível de analisar devido ao odor intenso que provinha das boxes dos animais, que se encontravam nas imediações. O ponto P1 era o que apresentava quase sempre um cheiro mais intenso, podendo dever-se ao facto de o nível da água da Fito-ETAR estar acima do substrato (Figura 5.1). O nível da água pode também estar relacionado com o mês de março ter sido chuvoso (Figura 3.18), o que nos indica que potencialmente poderá haver um aumento do caudal da fito-ETAR, podendo trazer dificuldades ao seu funcionamento (<http://snirh.pt>). Segundo Relvão (1999), o nível da água deve estar sempre abaixo do substrato, reduzindo assim o odor e também possíveis acumulações de mosquitos sobre a superfície da água. O calor também é um fator importante, pois intensifica o cheiro do efluente na entrada da Fito-ETAR. Estes são alguns dos motivos da necessária manutenção das fito-ETAR, que podem não interferir com a sua viabilidade, mas que causam alguns desconfortos e constrangimentos durante o seu funcionamento (e.g., Relvão, 1999).

O Eh expõe a variabilidade das condições de oxidação-redução no interior da Fito-ETAR. Nestes locais o Eh pode variar de -400 mV (muito reduzido) a +700 (muito oxidado) (Ferreira Mavioso, 2010). O Eh mais reduzido verificado foi de -228 mV, em março no ponto CD, e o mais oxidado de +143 mv, em julho no ponto P2. Nos valores analisados podemos verificar que o Eh é mais reduzido consoante a carga de CQO, a necessidade interna de oxigénio e a transferência do mesmo. Este parâmetro depende muito do enchimento do leito, a porosidade por exemplo, para que haja trocas de oxigénio entre o meio e as macrófitas presentes no leito (Ferreira Mavioso, 2010; Kadlec, 2009; Kadlec e Wallace, 2008). Este apresenta na maior parte dos locais analisados, um ambiente redutor. O ponto de amostragem “poço de armazenamento”, da segunda campanha, não foi analisado devido à água estar a um nível inferior do possível para se proceder à medição.

É possível constatar a clara necessidade de todos estes pontos no sistema, de forma que ocorra um tratamento mais eficiente e que, o ponto P3, seja aquele com valores de remediação mais favoráveis, para que a água tratada possa ser reutilizada.

Com o intuito de aprofundar a investigação efetuada, na Tabela 5.2 apresentam-se os resultados dos parâmetros analisados em laboratório para os pontos de amostragem (P1, P2 e P3) para as 5 campanhas efetuadas (entre março e julho de 2022).

Tabela 5.2 - Resultados dos parâmetros analisados em laboratório dos pontos de amostragem P1, P2 e P3. VMR e VMA correspondem ao DL 236/98 referente à qualidade da água destinada à rega e VLE referente à descarga de águas residuais. Todos os resultados são expressos em mg/L, com exceção da turbidez, que se apresenta em NTU e da alcalinidade que está expressa em mg/L de CaCO<sub>3</sub>.

\* valor correspondente ao DL 119/2019, Classe D.

Parâmetros	Campanhas															VMR	VMA	VLE
	março/2022			abril/2022			maio/2022			junho/2022			julho/2022					
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3			
CQO	369	189	66	273	124	50	426	154	40	1235	228	85	1500*	228	44	-	-	150
Alcalinidade	546,25	458,75	423,75	484,5	411,25	395	407,5	520	480	520	507,5	440	540	585	485	-	-	-
SST	2748	1112	327	410	28	1,5	168	190	7,5	1470	408	7,3	392	456	38,5	60	35 *	-
Turbidez	204,7	60,2	4,03	60,5	8,79	5,58	83,4	86,05	8,19	858	92,5	9,13	738,3	91	26,4	-	-	-
F <sup>-</sup>	0,22	0,29	0,37	0,24	0,4	0,39	0,39	0,33	0,09	0,46	0,24	0,16	15,5	0,17	0,15	1 (2)*	15	-
Cl <sup>-</sup>	29,29	29,75	30,87	30,16	25,64	26,18	23,77	25,24	25,63	30,45	36,09	29,69	25,56	29,67	28,16	70	-	-
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,62	0,42	0,36	0,29	0,24	0,31	0,31	0,35	0,44	0,08	0,44	0,45	0,28	0,23	0,39	-	-	-
Br <sup>-</sup>	1,41	1,81	1,52	1,99	1,31	1,46	1,89	1,45	1,5	1,94	1,83	1,59	1,98	1,22	1,72	-	-	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,23	0,27	0,09	0,01	0,2	0,03	0,02	0,03	0,14	<0,01	0,06	0,03	0,04	0,38	0,03	50	-	50
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	34,45	65,44	41,38	61,85	38,91	50,14	44,37	41,35	42,17	96,34	96,7	84,35	87,52	48,93	67,28	-	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,09	1,28	5,14	1,25	1,08	3,4	10,57	4,09	3,13	2,97	7,59	3,91	8,71	6,59	3,13	575	-	2000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	100,5	73,7	83,1	108,6	88,5	96,4	92,8	109,4	87,8	137,5	65,3	157,4	101,5	82,1	100,3	-	-	10

Relativamente ao parâmetro CQO, verifica-se que o valor mais elevado foi de 1500 mg/L, no ponto P1, na última campanha (encontrando-se este na gama escolhida para a análise do mesmo - gama média) e o valor mais baixo foi de 40 mg/L, no ponto P3 em maio de 2022. De uma maneira geral, estes foram os pontos com maior e menor CQO, como seria de esperar. O ponto P1, tal como já referido, é indicativo do início da fito-ETAR, e, portanto, do início do tratamento. Já o ponto P3 corresponde ao ponto final (torneira), onde já é utilizada a água tratada. Segundo o DL 236/98, o valor máximo permitido em descarga é de 150 mg/L. Deste modo, todas as campanhas encontraram-se dentro do valor limite de emissão (Oliveira, 2008). De salientar que na última campanha observou-se, na Fito-ETAR, o aparecimento de dejetos de animais no tubo que dá entrada ao afluente na fito-ETAR, elevada quantidade de biomassa de plantas (podendo levar à obstrução do local de entrada da água), reduzida circulação de água, potenciando a formação de uma camada de matéria orgânica e confirmando assim, um valor tão elevado de CQO. De acordo com vários autores (e.g., Oliveira, 2008), o valor de CQO é tanto maior quanto maior a quantidade de carga orgânica inserida no meio. Estes aspetos podem ter-se devido a dois motivos: reduzida precipitação (em contexto de mudanças climáticas extremas) e falta de manutenção da própria fito-ETAR, no que diz respeito ao corte sazonal da vegetação, numa fase onde seria necessário devido ao seu elevado crescimento. É de acrescentar que, segundo Relvão (1999), a taxa de eficiência deste tipo de sistemas é tanto maior quanto maior a taxa de remoção dos produtos orgânicos através das plantas. Estes podem ser exacerbados através do corte periódico da biomassa.

A análise dos SST demonstra uma grande variabilidade entre pontos. À semelhança de outros parâmetros, o local de amostragem P1, início da Fito-ETAR, apresenta valores muito elevados, com máximos de 2748 mg/L. No ponto P2, é possível observar uma imediata redução dos valores de SST. Isto pode dever-se à maior remoção de SST ocorrer no início da entrada do afluente para a Fito-ETAR. Este local inicial, é onde se encontra a maior percentagem de matéria orgânica, levando a uma maior atividade microbiológica e respetivos processos de remoção (Oliveira, 2007).

No ponto P3, torneira, a campanha de março de 2022 mostra uma concentração um pouco mais elevada, de 327 mg/L. Contudo, obtiveram-se valores baixos no decorrer das campanhas, os quais estão em conformidade com os requisitos da Legislação Portuguesa do DL 236/98, que apresenta um VMR para os SST de 60 mg/L. No DL 119/2019, segundo a classe de água D os valores de SST devem ser  $\leq 35$  mg/L, assim podemos observar, através dos

resultados obtidos, que os valores da campanha de março e julho de 2022 não estão em conformidade com o Decreto-Lei referido. De modo geral, a campanha de março foi a que apresentou valores mais altos e a de abril valores mais baixos.

No que diz respeito à turbidez, os valores apresentados referem-se a médias de três réplicas efetuadas, para cada um dos pontos. A Tabela 5.2 mostra que o ponto de amostragem P1 apresenta valores muito elevados de turvação da água. Estes são tidos como esperados, tendo em conta o local que recebe o afluente da fossa séptica não apresentar nenhum tratamento prévio, e acumulando sucessivamente matéria orgânica e inorgânica. Este apresenta turbidez máxima de 858 NTU, na campanha de junho. O local de amostragem P2 apresenta já, valores mais baixos, com um máximo de 92,5 NTU. O ponto P3, torneira, é o local que apresenta valores mais reduzidos. Este ponto representa o final da depuração do afluente. O valor máximo de turbidez é de 26,4 NTU e mínimo de 4,03 NTU, em março e julho de 2022 respetivamente. Desta forma, constata-se o impacto que as condições climáticas apresentam nos parâmetros analisados, sendo deveras relevante o estudo das diferentes épocas hidrológicas neste tipo de sistemas.

Segundo Abou-Elela e Hellal (2012) e Vymazal (2009), grande parte das fito-ETAR são capazes de fornecer níveis confiáveis de tratamento, como é possível verificar em relação aos SST, por exemplo. Contudo, frequentemente são menos eficazes na remoção de alguns nutrientes. Segundo os mesmos autores, tal contrariedade é potencialmente revertida caso haja uma oxigenação mais capaz. No que diz respeito aos valores de  $\text{NH}_4^+$ , amónio, estes são bastante elevados. A Fito-ETAR em estudo parece não conseguir efetuar nitrificação suficiente, de forma que haja redução da concentração de amónio até ao VLE de 10 mg/L previsto no DL 236/98 (Ministério do Ambiente, 1998). Em algumas circunstâncias verifica-se que a concentração de amónio na entrada do afluente na Fito-ETAR é inferior à concentração de amónio à saída do leito, como acontece na campanha junho de 2022. Ou seja, em vez de haver uma redução como esperado, há um aumento na produção de amónio. Esta situação pode ocorrer devido à decomposição anaeróbica do azoto orgânico que permanece preso nos leitos. Como são anaeróbios não há oxigénio suficiente para que haja oxidação do amónio em nitrato (Oliveira, 2007). Algo que se verificou no local de estudo foi a baixa utilização da água tratada, no ponto P3, que permite assim uma maior estagnação no leito, acabando por ser prejudicial ao tratamento. Uma solução, poderia passar por haver uma maior circulação de água no circuito de tratamento.

Em consonância, as formas oxidadas de azoto ( $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$ ) exibem valores muito reduzidos em todos os pontos amostrados. Estes parâmetros encontram-se, por isso, bem abaixo dos VLE de 50 mg/L. A remoção das diferentes formas de azoto, está também dependente do bom crescimento das plantas, uma vez que os mecanismos de nitrificação e absorção destas, são os principais mecanismos de remoção deste elemento (Simoes, 2009; Vymazal, 2010). Tal facto foi observado, apresentando as plantas bom crescimento vegetativo (Figura 5.2). Sendo este tipo de leito de macrófitas maioritariamente anaeróbio, a formação de nitritos e nitratos ocorre por oxidação do amónio (nitrificação) nas zonas onde o oxigénio dissolvido apresenta concentrações acima de 1 mg/L (Randerson et al., 2007; Simoes, 2009; Tchobanoglous et al., 2014), bem acima das concentrações detetadas.



Figura 5.2 - *Phragmites australis* presente na fito-ETAR na campanha de junho.

Contudo, e tal como referido anteriormente, o desbaste da parte aérea seria de grande importância para um aumento da taxa de eficiência da fito-ETAR. A manutenção, no que toca à remoção de material vegetal estagnado na fito-ETAR, como folhas em decomposição, também seria uma mais-valia.

No que diz respeito ao sulfato, este não ultrapassa o limite imposto pela legislação de VMA de 575 mg/L e encontra-se muito abaixo do VLE. Este, apresenta-se variável ao longo dos pontos de amostragem, contudo dentro dos limites requeridos (Ministério do Ambiente, 1998).

Na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados dos elementos potencialmente tóxicos (EPT) analisados na 1ª e 4ª campanha. Estes foram seleccionados por constarem no Decreto-Lei nº 119/2019, Anexo I, referente às Normas de qualidade de água para reutilização para rega e, no Decreto-Lei nº 236/98, Anexo XVI, referente à qualidade das águas destinadas à rega. Contudo,

foram adicionados outros por se poderem apresentar características disruptoras para o ambiente e animais (Gomes e Valente, 2019). Os valores máximos recomendáveis, admissíveis e normas de qualidade encontram-se também na referida tabela (Ministério do Ambiente, 1998).

Tabela 5.3 - Resultados dos EPT analisados nas campanhas de março e junho (1ª e 4ª campanha). Estes estão expressos em mg/L. VMR e VMA referentes ao Decreto-Lei nº 236/98, NQ = Norma de qualidade referente ao Decreto-Lei nº 119/2019 (Normas de qualidade de água para reutilização para rega para proteção das culturas agrícolas, florestais e solos).

Parâmetros	Campanhas						VMR	VMA	NQ
	P1 mar	P2 mar	P3 mar	P1 jun	P2 jun	P3 jun			
Li	0,033	0,022	0,023	0,048	0,035	0,029	2,5	5,8	2,5
Be	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,5	1	0,1
Al	0,024	0,017	0,016	0,056	0,024	0,049	5	20	5
V	< 0,0002	0,0003	0,0002	0,0002	0,0004	0,0004	0,1	1	0,1
Cr	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,1	20	–
Mn	0,0607	0,14	0,0884	0,043	0,0327	0,0589	0,2	10	0,2
Fe	0,23	0,35	0,05	0,19	0,15	0,23	5	–	2
Co	0,000201	0,00027	0,000185	0,000469	0,000412	0,000724	0,05	10	0,05
Ni	0,0013	0,0009	< 0,0006	0,002	0,0011	0,0017	0,5	2	–
Cu	0,001	0,0013	< 0,0004	0,0034	0,0015	0,0246	0,2	5	–
Zn	0,0264	0,0154	0,0114	0,0243	0,0171	0,0264	2	10	–
As	0,00397	0,0131	0,0151	0,00569	0,037	0,0234	0,1	10	–
Se	0,0005	< 0,0004	< 0,0004	0,0005	< 0,0002	< 0,0002	0,02	0,05	0,02
Mo	0,0003	< 0,0002	0,0004	0,0006	0,0016	0,0006	0,005	0,05	0,01
Cd	0,00002	0,00002	< 0,00002	0,00001	< 0,00001	0,00001	0,01	0,05	–
Sn	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0001	0,0001	< 0,0001	2	–	–
Ba	0,0094	0,0071	0,0027	0,0103	0,0024	0,0031	1	–	–
Pb	0,00052	0,00032	0,00012	0,0012	0,00026	0,00091	5	20	–

Os resultados exibem concentrações muito inferiores às estipuladas para os valores máximos recomendados, estando longe dos valores máximos admitidos. Estes parâmetros encontram-se assim, todos, em conformidade com as normas de qualidade da água destinadas à irrigação. Tal situação pode dever-se ao tipo de efluente tratado. Apresentando características de um efluente doméstico, as cargas metálicas e potencialmente tóxicas são bastante inferiores do que se se tratasse de outro tipo de efluente, por exemplo, industrial (Oliveira, 2008).

## 5.2. Eficiência da Fito-ETAR – Taxas de remoção

De forma a avaliar a viabilidade e eficiência da fito-ETAR em questão, estudou-se as taxas de remoção dos elementos já analisados, desde a entrada para tratamento (ponto P1), até à sua utilização (ponto P3). Assim, na Figura 5.3, é possível observar a respetiva percentagem de remoção, ao longo das cinco campanhas, de três dos parâmetros essenciais no tratamento de água: CQO, SST e turbidez.

Os resultados demonstram uma remoção elevada para todos os parâmetros avaliados, com destaque para os SST, cuja percentagem mais elevada de remoção rondou os 99,6% (campanha de abril), sendo a mais baixa de 88%, em março de 2022. Verifica-se uma percentagem de remoção média de 95%, estando de acordo com os requisitos da eficiência mínima referidos na Tabela 2.1.

No que diz respeito à turbidez, a percentagem mais elevada foi de 99%, na campanha de junho de 2022 e a mais baixa de 90%, em maio de 2022. À semelhança do que aconteceu para os SST, a percentagem de remoção média para este parâmetro é de 95%.

Relativamente ao CQO, a percentagem de remoção mais elevada é referente à última campanha (97%), sendo a mais baixa de 81%, em abril. A percentagem média de remoção deste parâmetro foi de 89%. Encontra-se, portanto, bem acima dos padrões considerados de qualidade e nos níveis de tratamento de descargas em meios sensíveis (DL 152/97) (Tabela 2.1) o qual refere uma redução mínima de CQO de 75%. (Oliveira, 2007).

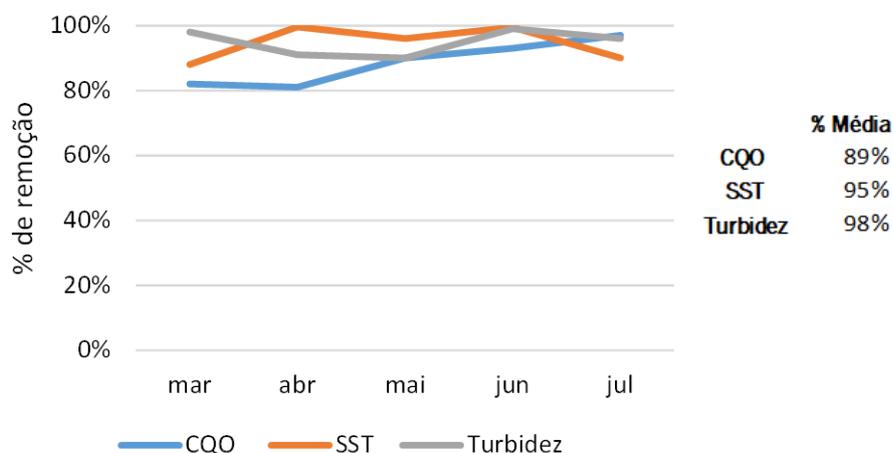


Figura 5.3 - Percentagem de remoção e percentagem de remoção média dos parâmetros CQO, SST e Turbidez, nas 5 campanhas analisadas.

Na Figura 5.4 apresenta-se uma análise das taxas de remoção de alguns elementos, tais como: Li, Al, Fe, Ba e Pb. Estes foram selecionados por se apresentarem na literatura como possuidores de características tóxicas para animais e ambiente (Gomes, 2021; Schneider et al., 2018). Para tal, foi efetuada uma média das duas campanhas.

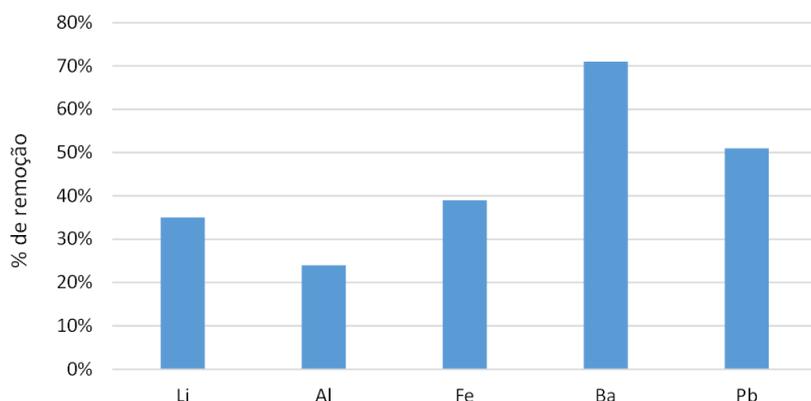


Figura 5.4 - Média da percentagem de remoção do Li, Al, Fe, Ba e Pb.

Como é possível observar o Lítio (Li) apresenta uma percentagem de remoção de 35%, o Alumínio (Al) de 24%, o Ferro (Fe) de 39%, o Bário (Ba) de 71% e o Chumbo (Pb) de 51%. Estes resultados indicam um bom desempenho da Fito-ETAR na remoção de EPT da água. Estes elementos, apesar de potencialmente tóxicos, mas, com exceção do Al, são também considerados micro e macronutrientes para as plantas (Mestre, 2014). Como se encontram em baixas concentrações, acabam por não induzir grau de toxicidade ao tecido vegetal, sendo, por outro lado, empregues nas reações metabólicas e portanto, benéficos para o seu próprio crescimento e desenvolvimento saudável (Amado, 2007; Mestre, 2014).

### 5.3. Avaliação da Qualidade da Água

A avaliação da qualidade de água neste trabalho apresenta-se de elevada importância, visto ser o propósito final do estudo em questão. Devido ao risco iminente de secas prolongadas, a reutilização apresenta-se como um fator chave. Contudo, é necessário assegurar a qualidade mínima para este fim. Assim, apresenta-se na Figura 5.5 as características hidroquímicas das amostras de água recolhidas. A projeção das amostras no diagrama de Piper indica que estas são maioritariamente águas bicarbonatadas mistas e cálcicas bicarbonatadas. As amostras P2 e P3

de março de 2022 e P1, P2, P3 de junho de 2022 são classificadas como bicarbonatadas mistas. A amostra P1 de março de 2022 é classificada como cálcica bicarbonatada.

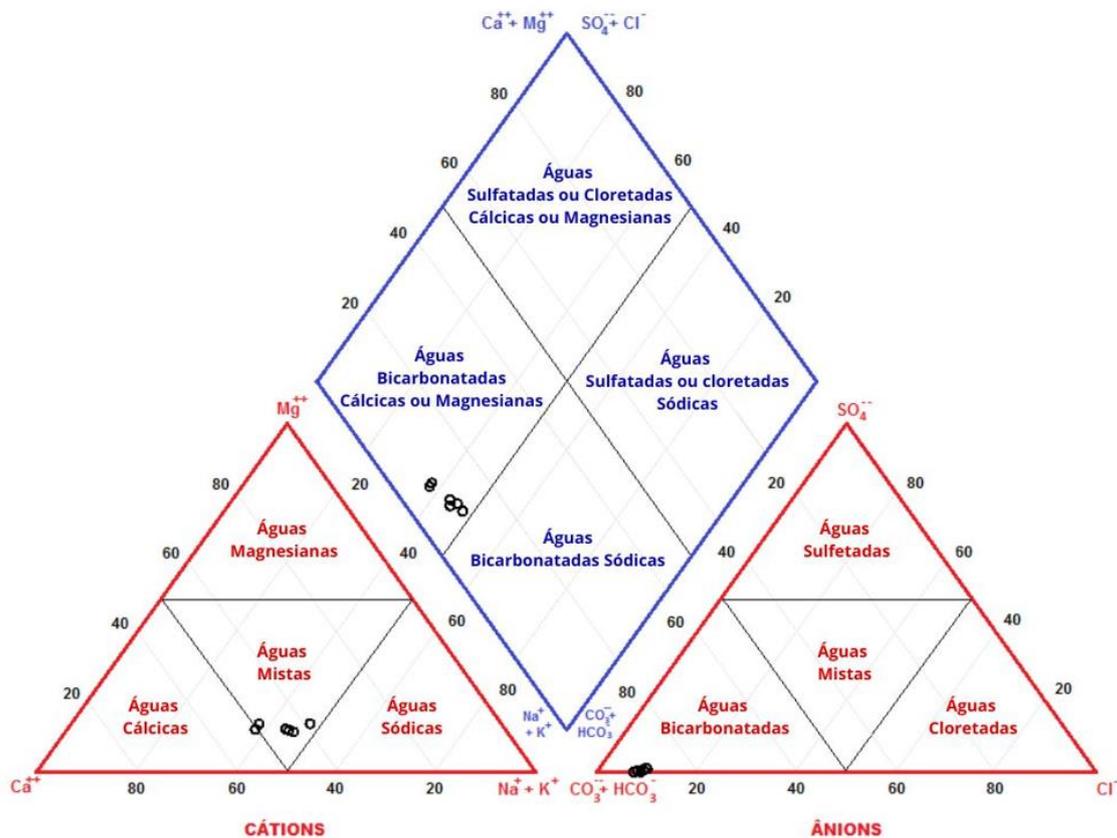


Figura 5.5 - Resultados da classificação hidroquímica das amostras de água. Diagrama de piper.

Para a realização do diagrama apresentado acima, foram utilizadas as amostras da 1ª e 4ª campanha, apresentando assim um total de 6 amostras de água. Como é possível observar, a maior concentração de aniões é de  $\text{HCO}_3^-$ , seguido do  $\text{Cl}^-$ , sendo o  $\text{SO}_4^-$  o que apresenta concentrações baixas. Nos catiões é possível observar uma dominância do Ca.

O risco de salinidade e sódio estão entre os principais fatores que afetam a adequação da água para irrigação (Mirabbasi et al., 2008). Assim, torna-se pertinente a sua avaliação através de uma ferramenta clássica, onde as amostras são estudadas de acordo com os valores de CE e SAR. O diagrama de classificação para águas de irrigação é apresentado na Figura 5.6.

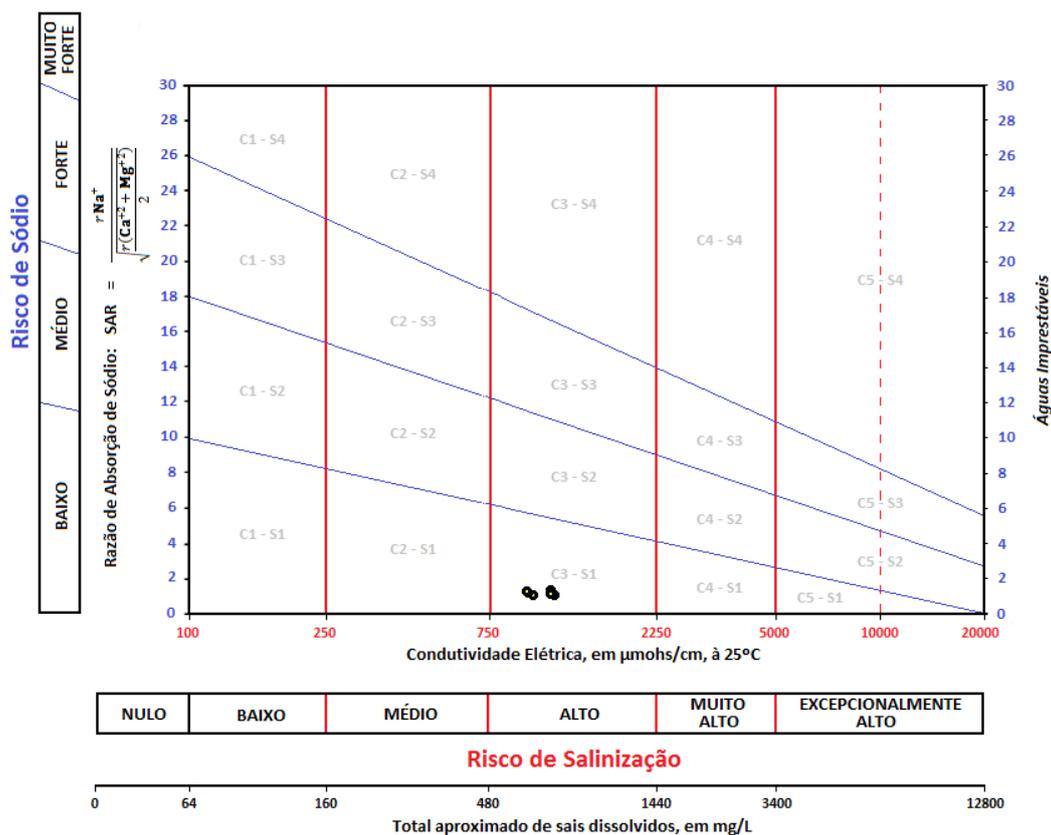


Figura 5.6 - Diagrama de classificação para água de irrigação.

Os resultados revelam que as amostras estão inseridas no grupo C3-S1, indicador de um alto risco de salinização e baixo risco de sódio. Este fenômeno pode interferir com as propriedades do solo regado, influenciando as suas características físicas e químicas, podendo levar à sua erosão (Gomes, 2021; Gomes et al., 2018). Contudo, este apresenta um valor de SAR inferior a 2. Segundo a Legislação em vigor (Decreto-Lei nº 236/98), para a qualidade das águas destinadas à rega, este deve apresentar um VMR, para o SAR, de 8 (Ministério do Ambiente, 1998). Desta forma, pode-se dizer que as amostras de água não representam um risco de sódio, pois verifica-se um  $\text{SAR} < 2$ . Contudo, como evidencia um alto risco de salinização, é necessária uma monitorização semestral (Ministério do Ambiente, 1998). O mesmo decreto refere que, se após dois anos consecutivos não se verificar nenhum fenômeno suscetível de provocar uma degradação da qualidade da água e os resultados analíticos forem inferiores ou iguais ao VMR, o recomendado será uma frequência de amostragem de uma vez por ano, durante o período de irrigação.

## 6. Conclusões

A qualidade dos recursos hídricos é um aspeto essencial para o cumprimento dos objetivos de sustentabilidade, incluindo a promoção do desenvolvimento económico, bem como a conservação do ecossistema. Aliado às alterações climáticas e seca extrema que se tem vindo a sentir, não só em Portugal, como noutras áreas do globo, a reutilização deste recurso apresenta-se como uma solução perante a escassez de água.

Assim, conceitos de reaproveitamento, em contexto de economia circular e utilizando sistemas ecológicos e sustentáveis para o seu tratamento, são cada vez mais uma premissa. Desta forma, a aplicação da fitorremediação em contexto de fito-ETAR, surge na promoção do bem-estar dos ecossistemas, requerendo uma reduzida manutenção e apresentando um baixo custo de implementação. Estas vantagens tornam o sistema apelativo para aplicação em pequenos aglomerados populacionais e zonas remotas.

O conceito de reutilização de água foi a base para o trabalho apresentado, inserido nas premissas da economia circular, promovendo assim, a sua valorização, face ao desperdício de água e contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

As propriedades hidroquímicas obtidas apresentaram valores dentro do esperado, considerando a sua proveniência: águas residuais. Os diferentes pontos de amostragem (P1, P2, P3), sugerem resultados muito satisfatórios no que toca à conformidade legal. O ponto P3, local final do sistema de tratamento – torneira, encontra-se dentro dos VMA e VMR para praticamente todos os parâmetros analisados. Como exceção, apresenta-se o  $\text{NH}_4^+$ . Este não está em concordância com os requisitos legais estabelecidos. O parâmetro amónio foi não conforme em todas as amostragens. Tal facto pode dever-se à fraca circulação de água no sistema, por meio da sua baixa utilização, o que provocou tempos de armazenamento no sistema muito prolongados. Outra situação passa também pela baixa manutenção à fito-ETAR, no que toca à retirada de matéria orgânica acumulada nos leitos e à ausência de desbaste das espécies implementadas – *Phragmites australis*.

No que diz respeito às taxas de remoção e qualidade da água tratada, as amostras apresentam-se bem acima dos padrões considerados de qualidade e dos níveis de tratamento de descargas em meios sensíveis, para os parâmetros analisados: CQO, SST e turbidez. Estes

apresentaram valores máximos de remoção de 97, 99,6 e 99%, respetivamente. A análise destes resultados permite aferir o bom desempenho da fito-ETAR na remoção destes três parâmetros.

Nas características hidroquímicas das amostras de água recolhidas de referir que o parâmetro SAR apresentou um valor inferior a 2 não excedendo o VMR de 8 definido pela legislação. Contudo, mesmo apresentando um baixo risco de sódio, os resultados demonstraram um alto risco de salinização, sendo recomendado uma monitorização semestral.

As campanhas realizadas na época seca, conferem, do ponto de vista hidroquímico, maior exigência, principalmente pela concentração mais elevada de elementos com características disruptoras dos ecossistemas. O constatado para este período foi a redução de precipitação e aumento da temperatura. Contudo, as taxas de remoção de contaminantes mantiveram-se elevadas, apresentando eficiências por vezes mais altas, quando comparadas com campanhas mais chuvosas. Estes dados sugerem que, num país em estado de alerta devido à falta de água de qualidade, a aplicação de técnicas de fitorremediação parece apresentar robustez suficiente de sobrevivência. Visto que se trata de um sistema de tratamento maioritariamente vivo, pode ser considerada a sua aplicação em situações de escassez de água, comprovado pela sua eficiência.

Com os resultados obtidos e a sua avaliação, pode-se concluir quanto à possibilidade da reutilização da água residual tratada em contexto de fito-ETAR para fins de irrigação. Contudo, critérios de manutenção básica e métodos afincadas de monitorização, devem ser aplicados ao sistema.

## 7. Bibliografia

- Abou-Elela SI, Hellal MS. Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with Canna, Phragmites and Cyprus. *Ecol Eng* (2012). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.044>.
- Amado L. *Sistemas de Tratamento de Águas Residuais por Zonas Húmidas Artificiais em Portugal* (2007).
- ASTM. *Standard Practice for Cleaning Laboratory Glassware, Plasticware, and Equipment* (1998).
- AWWA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1992).
- Baoddh K, Singh B, Korstad J. Phytoremediation potential of bioenergy plants. *Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants* (2017). <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3084-0>.
- Belloni L, Alves M, Por O, Espinheira RJ, Coorientada M, Doutora P, et al. Potencial de fitorremediação por plantas de solo contaminado por metais tóxicos (2018).
- Bila DM, Dezotti M. Fármacos no meio ambiente. *Quim Nova* (2003). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000400015>.
- Brinson MM, Malvárez AI. Temperate freshwater wetlands: Types, status, and threats. *Environ Conserv* (2002). <https://doi.org/10.1017/S0376892902000085>.
- Brix H. *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (1993). <https://doi.org/10.1201/9781003069997-3/>.
- Canais Seco T, L Sampaio Duarte AA, Alcides Peres J, Bentes I. Avaliação do Desempenho de Sistemas de Leitões de Macrófitas no Tratamento de Águas Residuais Domésticas (2008).
- Carty A, Scholz M, Heal K, Gouriveau F, Mustafa A. The universal design, operation and maintenance guidelines for farm constructed wetlands (FCW) in temperate climates. *Bioresour Technol* (2008). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.045>.
- Chaney RL, Malik M, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS, et al. Phytoremediation of soil metals. *Curr Opin Biotechnol* (1997). [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(97\)80004-3](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(97)80004-3).
- Comissão Europeia. Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia de 23 de outubro de 2000.
- Costa DMA, Barros Júnior AC. Costa e Barros Júnior, (2005). *Holos* 2005:81–101.
- Coutinho et al. Alternative soil remediation: bioremediation and phytoremediation (2015). <https://doi.org/10.3738/1982.2278.1400>.
- Demarco CF. Universidade Federal de Pelotas centro de engenharias curso de engenharia ambiental e sanitária Trabalho de Conclusão de Curso (2016).
- Diário Da República nº 159/2019 (2019). Presidência do Conselho de Ministros. Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto.
- Dias S. Espaço circular (2020).
- EU PE. Diretiva n.º 91/271/CEE: relativa ao tratamento de águas residuais urbanas. *Journal Oficial Das Comunidades Europeias* (1991).

- Favas et al. Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora. *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination* (2014). <https://doi.org/10.5772/57469>.
- Ferreira Mavioso J. Tratamento de águas residuais através de Leitões de Macrófitas A influência da vegetação (2010).
- Gomes, P. (2021) - Impacto dos processos de drenagem ácida na qualidade ambiental e acumulação potencial de metais estratégicos em barragens localizadas na Faixa Piritosa Ibérica. Tese de Doutoramento, Univ. Minho, Braga, 319p.
- Gomes, P. (2011) - Processos de reabilitação natural em escombrelas de minas abandonadas – Estudo de casos. Tese de Mestrado, Univ. Porto, Porto, 121p.
- Gomes P, Valente T, Braga MAS, Grande JA, de la Torre ML. Enrichment of trace elements in the clay size fraction of mining soils. *Environmental Science and Pollution Research* (2016). <https://doi.org/10.1007/S11356-015-4236-X/figures/3>.
- Gomes P, Valente T, Geraldo D, Ribeiro C. Photosynthetic pigments in acid mine drainage: Seasonal patterns and associations with stressful abiotic characteristics. *Chemosphere*, Volume 239 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124774>
- Gomes P, Valente T, Pamplona J, Sequeira Braga MA, Pissarra J, Grande Gil JA, et al. Metal Uptake by Native Plants and Revegetation Potential of Mining Sulfide-Rich Waste-Dumps. *Int J Phytoremediation* (2014). <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.810586>.
- Gomes P, Valente T, Pereira P. Addressing Quality and Usability of Surface Water Bodies in Semi-Arid Regions with Mining Influences. *Environmental Processes* 5, 707–725 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0329-0>
- Gomes, P.; Valente, T. (2019) - Physical and chemical conditions for colonization by *Euglena mutabilis*: case studies in two acid mine drainage sites. In *mine water: technological and ecological challenges: IMWA 2019 “Mine Water: Technological and Ecological*.
- Gopal B. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems. *Water Science and Technology* (1999). [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00468-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00468-0).
- de Groot RS, Wilson MA, Boumans RMJ. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* (2002). [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7).
- Gunes K, Tuncsiper B, Masi F, Ayaz S, Leszczynska D, Findik Hecan N, et al. Construction and maintenance cost analyzing of constructed wetland systems. *Water Pract Technol* (2011). <https://doi.org/10.2166/wpt.2011.043>.
- Jardim Botânico UTAD | Flora Digital de Portugal. n.d. (<https://jb.utad.pt/flora>).
- Kadlec RH. Wetlands for Contaminant and Wastewater Treatment. *The Wetlands Handbook* (2009). <https://doi.org/10.1002/9781444315813.ch20>.
- Kadlec RH, Wallace S. *Treatment Wetlands* (2008). <https://doi.org/10.1201/9781420012514>.
- Köbbing JF, Thevs N, Zerbe S. The utilisation of reed ( *Phragmites australis* ): a review. *Mires and Peat* (2013).

- Lakshmi T, Madhusudhanan N, Rajendran R. *Nymphaea alba* Linn-An Overview. *Research J Pharm and Tech* (2013).
- Catarino L, Moreira I, Ferreira T, Duarte M. *Plantas Aquáticas Infestantes de Valas e Canais*. ISAPress (2001).
- McGrath SP, Zhao FJ. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Curr Opin Biotechnol* (2003). [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(03\)00060-0](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(03)00060-0).
- McGrath SP, Zhao J, Lombi E. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. *Advances in Agronomy* (2002). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75002-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75002-5).
- Mendes A. *Fito-ETAR: uma eco-tecnologia aplicada ao tratamento de águas residuais: Análise do Comportamento Hidráulico* (2010).
- Mendonça Bandejas R. Universidade da Beira interior Avaliação da influência da vegetação na variação das características hidrodinâmicas em leitos de escoamento subsuperficial e horizontal (2009).
- Mestre AB. *Contribuição Para O Estudo De Propagação E Produção De Plantas Aquáticas* (2014).
- Ministério do Ambiente. Decreto-Lei n.º 236/98. *Diário Da República* n.º 176/1998, Série I-A de 1998-08-01 (1998); N.º 176:3676–722.
- Ministério do Ambiente. Ministério do Ambiente. *Diário Da República* (1997); I-Série A:4775–80.
- Mirabbasi R, Mazlounzadeh M, Rahnama B (2008) Evaluation of irrigation water quality using fuzzy logic. *Res J Environ Sci* 2:340–352.
- Monte H, Albuquerque A. *Reutilização de Águas Residuais* (2010).
- Mullin BH. The biology and management of purple loosestrife (*Lythrum salicaria*). *Weed Technology* (1998). <https://doi.org/10.1017/s0890037x00043992>.
- Mustafa HM, Hayder G. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal* (2021). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.009>.
- Oliveira JM. Universidade Nova de Lisboa Estudo da Influência do Material de Enchimento na Remoção de Matéria Orgânica, Azoto e Sólidos em Leitos de Macrófitas do Tipo ESSH (2008).
- Oliveira JM da SC. Diagnóstico e optimização do tratamento de águas residuais em leitos de macrófitas (2007).
- Parde D, Patwa A, Shukla A, Vijay R, Killedar DJ, Kumar R. A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environ Technol Innov* (2021); <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>.
- Patrícia Borges SP. Universidade Federal Fluminense instituto de química departamento de geociências programa de pós-graduação em geociências (2014).
- Pilon-Smiths E. Phytoremediation. *Annu Rev Plant Biol* (2005). <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>.
- Randerson PF, Jordan G, Williams HG. The role of willow roots in sub-surface oxygenation of vegetation filter beds - Mass spectrometer investigations in Wales, U.K. *Ecohydrology and Hydrobiology* (2007); [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70108-8](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70108-8).

- Rebello A, Franco A. Guia para a reutilização de água - usos não potáveis (2019).
- Relvão AM. Sistemas de tratamento de efluentes em aglomerados urbanos por leitos e macrófitas emergentes. Comissão de Coordenação da Região Centro (1999).
- Ribeiro ML, Lourencetti C, Pereira SY, Marchi MRR de. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. Quim Nova (2007); <https://doi.org/10.1590/s0100-40422007000300031>.
- Rico GH de V. FITO-ETAR`S (2018).
- Rodrigues MIG. Mariana Isabel Garcia Rodrigues Estudo da toxicidade da drenagem ácida através do uso de plantas tolerantes (2021).
- Santos NFS. Faculdade de Engenharia (2011).
- Schnoor JL. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center Technology Evaluation Report Phytoremediation (1997).
- Schneider, S.C.; Oulehle, F.; Kra, P.; Hruska, J. (2018) - Recovery of benthic algal assemblages from acidification: how long does it take, and is there a link to eutrophication? <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3254-8>.
- Shutes RBE. Artificial wetlands and water quality improvement. Environ Int (2001). [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00025-3).
- Simoes M de J. Avaliacao da influencia do tipo de enchimento no rendimento de leitos de macrofitas de escoamento subsuperficial e horizontal (2009).
- Simon RG, Stöckl M, Becker D, Steinkamp AD, Abt C, Jungfer C, et al. Current to Clean Water – Electrochemical Solutions for Groundwater, Water, and Wastewater Treatment. Chemie Ingenieur Technik (2018). <https://doi.org/10.1002/CITE.201800081>.
- Soares F, Santos D, Márcio ;, Lima Magalhães O, Nelson Mazur ;, Nelson ;, et al. Chemical amendment and phytostabilization of an industrial residue contaminated with zn and cd correção química e fitoestabilização de um resíduo industrial contaminado com Zn E Cd. Sci Agric (2007).
- Sutherland WJ. Iris Pseudacorus L (2009). Published by: British Ecological Society Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/2260902>.
- Tchobanoglous G, L. Burton F, Stensel DH. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Chemical Engineering (2014).
- Truu M, Juhanson J, Truu J. Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. Science of the Total Environment (2009). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.036>.
- Tunalier Z, Koşar M, Küpeli E, Çaliş I, Başer KHC. Antioxidant, anti-inflammatory, anti-nociceptive activities and composition of Lythrum salicaria L. extracts. J Ethnopharmacol (2007). <https://doi.org/10.1016/J.JEP.2006.10.024>.
- Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment. Water (Switzerland) (2010). <https://doi.org/10.3390/w2030530>.
- Vymazal, J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater (2009).
- Wallace S, Knight R. Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems (2006).

Wilson DR, Page IC, Cocci AA, Landine RC. Case history - Two stage, low-rate anaerobic treatment facility for South American alchochemical/citric acid wastewater. Water Science and Technology (1998). [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00496-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00496-X).

Zedler JB, Kercher S. wetland resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability (2005). <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.ENERGY.30.050504.144248>.

### **Páginas WEB**

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS - ONU. Agenda 2030 (<https://www.ods.pt/>)

Portal do clima (<http://portaldoclima.pt/pt/>)

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (<http://snirh.pt>)

Município de Amares (<https://amares.pt>)