



Reutilização da água residual tratada e das lamas geradas na ETAR da Base Aérea N°5 – Monte Real na produção de plantas para biofertilização

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

André Stéfano Colmachi Mosquera

Leiria, setembro de 2024



Reutilização da água residual tratada e das lamas geradas na ETAR da Base Aérea N°5 – Monte Real na produção de plantas para biofertilização

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

André Stéfano Colmachi Mosquera

Projeto realizado sob a orientação da Professora Doutora Helena Manuela Pala Dias de Sousa e da Professora Doutora Judite dos Santos Vieira

Leiria, setembro 2024

Originalidade e Direitos de Autor

O presente Projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Dedicatória

Dedicado do fundo do coração à minha querida mãe por me apoiar em todos os aspetos, do emocional ao económico, e sobretudo pela confiança que deposita em mim, ao meu pai por me ter ensinado o trabalho árduo, o esforço e a perseverança, ao meu irmão que me dá sempre o seu amor e é meu melhor amigo, Gostaria também de dedicar este trabalho à minha família, porque com base em todos os valores que recolhi ao longo da minha vida e em conjunto com os meus entes queridos, consegui atingir os meus objetivos. Dedico também este trabalho a todos os meus amigos que estiveram comigo desde o início até ao fim e me deram o seu tempo e amor, bem como a todos os meus colegas e professores, que me forneceram a base de conhecimentos necessária para concluir o meu curso da melhor forma possível.

“soul, life and heart”

Agradecimentos

Agradeço o imenso apoio e confiança que a minha família depositou em mim desde o início desta etapa assim como a presença e o carinho que me fez ter força para seguir em frente e lutar de cabeça erguida e com humildade. Agradeço à minha mãe Tatiana Mosquera por todo o seu apoio incondicional, ao meu irmão Santiago Colmachi e ao meu pai Jymmy Colmachi por serem os meus melhores amigos e a minha inspiração. Amo-vos muito.

Agradeço à professora Doutora Helena Manuela Pala Dias de Sousa, e à Professora Doutora Judite dos Santos Vieira pelo apoio, a ajuda, o acompanhamento em cada passo e a paciência durante todo o processo. Gostaria também de agradecer à Dra. Maria Carlos Rodrigues por todas as instruções e esclarecimentos na realização das análises feitas no laboratório de química, assim como o apoio dos estudantes e colegas de laboratório Ounisia Delgado e o meu bom amigo Tomás Luz, que me ajudaram a realizar as análises laboratoriais da melhor forma possível.

Agradeço à Unidade sediada na Base Aérea N.º 5, pela oportunidade de desenvolver o trabalho, facultando as amostras de água residual e lamas. Agradeço ainda ao Alferes Filipe Delgado e à Alferes Rita Santos pela sua disponibilidade e prontidão em fornecer a informação necessária.

Estou infinitamente grato a Deus, que é o meu guia nesta curta estrada chamada vida.

Este trabalho foi suportado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC): LSRE-LCM, UIDB/50020/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/50020/2020) e ALiCE, LA/P/0045/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0045/2020).

Resumo

A água é um recurso vital para a humanidade, essencial em praticamente todas as atividades diárias. A atividade agrícola, em particular, destaca-se como uma das áreas que mais dependem desse recurso, exigindo grandes volumes para garantir a produção alimentar global. Nesse contexto, é crucial adotar tecnologias que visem reduzir o consumo ou promover a reutilização da água, contribuindo assim para sua preservação.

O presente estudo teve como objetivo investigar a viabilidade da reutilização das águas residuais tratadas e das lamas produzidas na Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) da Base Aérea N°5 de Monte Real na produção de plantas capazes de fixar nutrientes, como fósforo e nitratos, com potencial para serem consideradas biofertilizantes eficazes na melhoria dos solos agrícolas.

O estudo foi desenvolvido em duas fases. A primeira envolveu a produção de feijão, uma espécie biofertilizante, em sistemas de pequena escala: um hidropónico com águas residuais da ETAR, usando uma solução nutritiva como controlo; e um sistema de solo/lamas, usando um solo orgânico como controlo. O controlo dos sistemas foi efetuado através da monitorização semanal dos parâmetros de crescimento das plantas, nomeadamente, altura das plantas, número de folhas, comprimento da raiz, número de vagens e número de flores; e de parâmetros físico-químicos, nomeadamente, pH, temperatura e condutividade elétrica. A segunda fase envolveu a aplicação das plantas de feijoeiro na produção de alface em lamas do ETAR, usando-as como biofertilizante, em diferentes percentagens (5% e 10%). O controlo da produção foi efetuado através da monitorização semanal dos parâmetros de crescimento das plantas, nomeadamente, número de folhas e altura da planta; e de parâmetros físico-químicos, nomeadamente, pH, humidade.

Os resultados do estudo demonstraram um bom crescimento das plantas de feijoeiro, tanto no sistema hidropónico como nas lamas, com eficiência na remoção de nutrientes, especificamente nos parâmetros $N-NO_3$, P_{Total} e $P-PO_4$, e sugerem que as plantas produzidas podem ser uma opção viável como biofertilizante, contribuindo para a fixação de nutrientes e melhoria da qualidade do solo, em particular nos solos com mistura de lamas. A utilização do feijoeiro como biofertilizante resultou num maior crescimento das plantas testadas (alface), verificando-se que o crescimento foi mais pronunciado nas lamas com 10% de biofertilizante, em comparação com os outros cultivos.

A valorização de águas residuais para produção de biofertilizante (feijoeiro) e das lamas de depuração de ETAR na incorporação em solos agrícolas, com produção de biomassa, permitiram concluir que a lama suplementada com biofertilizante poderá possibilitar uma economia no uso de fertilizantes químicos, e desta forma contribuir para uma gestão eficiente dos subprodutos do processo de tratamento de águas residuais, garantido a sua circularidade.

Palavras-chave: Água residual, lamas de ETAR, feijão (*phaseolus vulgaris L*), alface (*var. crispa L.*), biofertilizante.

Abstract

Water is a vital resource for humanity, essential for practically all daily activities. Agricultural activity, in particular, stands out as one of the areas most dependent on this resource, requiring large volumes to guarantee global food production. In this context, it is crucial to adopt technologies aimed at reducing consumption or promoting the reuse of water, thus contributing to its preservation.

The aim of this study was to investigate the feasibility of reusing the treated wastewater and sludge produced at the Wastewater Treatment Plant (WWTP) at Monte Real Air Base No. 5 in the production of plants capable of fixing nutrients such as phosphorus and nitrates, with the potential to be considered effective biofertilizers for improving agricultural soils.

The study was carried out in two phases. The first involved the production of beans, a biofertilizer species, in small-scale systems: a hydroponic system with wastewater from the WWTP, using a nutrient solution as a control; and a soil/sludge system, using organic soil as a control. The systems were controlled by weekly monitoring of plant growth parameters, namely plant height, number of leaves, root length, number of pods and number of flowers; and physical-chemical parameters, namely pH, temperature and electrical conductivity. The second phase involved the application of the bean plants in the production of lettuce in WWTP sludge, using them as biofertilizer, in different percentages (5% and 10%). Production was controlled by weekly monitoring of plant growth parameters, namely number of leaves and plant height; and physico-chemical parameters, namely pH, humidity.

The results of the study showed good growth of the bean plants, both in the hydroponic system and in the sludge, with efficiency in nutrient removal, specifically in the parameters N-NO₃, P_{Total} and P-PO₄ and suggest that the plants produced could be a viable option as a biofertilizer, contributing to the fixation of nutrients and improving soil quality, particularly in soils with sludge mixtures. The use of bean plants as biofertilizer resulted in greater growth of the plants tested (lettuce), with growth being more pronounced in sludge with 10% biofertilizer compared to the other crops.

The valorization of wastewater for the production of biofertilizer (beans) and of wastewater treatment plant sludge for incorporation into agricultural soils, with biomass production, led to the conclusion that sludge supplemented with biofertilizer could make it possible to save on the use of chemical fertilizers and thus contribute to the efficient management of the by-products of the wastewater treatment process, guaranteeing their circularity.

Palavras-chave: Água residual, lamas de ETAR, feijão (*phaseolus vulgaris L*), alface (*var. crispa L.*), biofertilizante.

Índice

<i>Originalidade e Direitos de Autor</i>	<i>iii</i>
<i>Dedicatória</i>	<i>iv</i>
<i>Agradecimentos</i>	<i>v</i>
<i>Abstract</i>	<i>viii</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>xi</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>xii</i>
<i>Lista de siglas e acrónimos</i>	<i>xiv</i>
1. Introdução	1
1.1. Motivação científica	1
1.2. Objetivos do estudo	2
1.3. Organização da dissertação	2
2. Circularidade dos recursos	4
2.1. Crescimento hidropónico de plantas	5
2.2. Crescimento de plantas em lamas de ETAR.....	11
2.3. Biofertilizantes vs. fertilizantes tradicionais	15
3. Caso de Estudo: ETAR da Base Aérea Nº 5 em Monte Real	20
3.1. Caracterização das águas residuais da ETAR da Base Aérea Nº5.....	23
3.2. Caracterização das lamas produzidas na ETAR da Base Aérea Nº5 Monte Real	31
4. Materiais e métodos	34
4.1. Cultivo de uma espécie com potencial biofertilizante	34
4.1.1. Seleção e cultivo do biofertilizante	34
4.1.2. Controlo dos sistemas de cultivo.....	37
4.1.3. Preparação do biofertilizante	39
4.2. Cultivo de plantas (alface) em solo/lamas da ETAR, com e sem biofertilizante	40
4.2.1. Sistema de cultivo	40
4.2.2. Controlo do sistema de cultivo	42

5.	<i>Resultados e Discussão</i>	44
5.1.	Cultivo de uma espécie com potencial biofertilizante	44
5.1.1.	Crescimento das plantas de feijoeiro em sistema hidropónico.....	44
5.1.2.	Crescimento das plantas de feijoeiro em solo e lamas da ETAR.....	48
5.1.3.	Crescimento do feijão em sistema hidropónico <i>versus</i> substrato sólido.....	51
5.2.	Cultivo de plantas em solo e lamas da ETAR, com e sem adição de biofertilizante ...	53
6.	<i>Conclusões e sugestões para trabalho futuro</i>	60
	<i>Referências Bibliográficas</i>	62

Lista de Figuras

Figura 1. Impacto da agricultura no meio ambiente (Oliva, 2017).	15
Figura 2. Dados geográficos e localização da Base Aérea N°5 Monte Real (EMAS, 2019).	20
Figura 3. Volumes anuais tratados na ETAR da Base Aérea N.º 5 Monte Real no período 2018 a 2022.....	21
Figura 4. Diagrama linear da ETAR da Base Aérea N.º 5 (Rocha, 2020).	23
Figura 5. Volumes mensais tratados na ETAR da Base Aérea N.º 5 (2018 a 2022).....	24
Figura 6. Valores trimestrais de pH, CBO ₅ e N _{TOTAL} na água residual à entrada da ETAR da Base Aérea N.º 5 (2018-2022).	25
Figura 7. Valores Mensais de pH, SST, CBO ₅ , N _{Total} , P _{Total} na água residual tratada da ETAR da Base Aérea N.º 5 (2018-2022) e Valores limite de emissão (VLE), de acordo com o Decreto de Lei nº 236/98.	28
Figura 8. Sistema de cultivo de feijão em sistema hidropónico e em solo/lamas.	36
Figura 9. Sistemas de cultivo de alface em substrato orgânico, lamas da ETAR e lamas da ETAR com biofertilizante	41
Figura 10. Variação dos valores de T, pH e CE durante o crescimento do feijoeiro em solução nutritiva (SN) e água residual (AR).	45
Figura 11. Variação da concentração de azoto e fósforo durante o crescimento do feijoeiro em solução nutritiva (SN) e água residual (AR).	46
Figura 12. Variação da altura das plantas, comprimento da raiz e n.º de folhas (valor médio) do feijoeiro em crescimento hidropónico em solução nutritiva (SN) e água residual (AR).	47
Figura 13. Variação da altura média das plantas, do comprimento da raiz e do nº de folhas durante o crescimento hidropónico do feijoeiro em solução nutritiva (SN) e água residual (AR).	48
Figura 14. Variação da concentração de azoto e fósforo durante o crescimento do feijoeiro em solo e lama da ETAR	49
Figura 15. Variação da altura média das plantas e do nº de folhas durante o crescimento do feijoeiro em solo orgânico e em lamas da ETAR.	50
Figura 16. Comparação do Nº de Folhas e Altura das plantas cultivadas em sistemas hidropónico e com substrato sólido	52
Figura 17. Resultados da avaliação da massa seca e do teor de humidade das plantas de feijoeiro (parte aérea)	53
Figura 18. Variação da concentração de N-NO ₃ , N-NKT e P _{Total} durante o crescimento da alface em solo orgânico e nas lamas da ETAR, com e sem biofertilizante.....	55
Figura 19. Variação da concentração de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K) durante o crescimento da alface em solo orgânico e em lamas da ETAR, com e sem biofertilizante.	57
Figura 20. Variação media de altura das plantas e do nº de folhas durante o crescimento da alface em solo orgânico e em lamas da ETAR, com e sem biofertilizante.	58
Figura 21. Resultados da avaliação da massa fresca, massa seca e do teor de humidade das plantas de alface	59

Lista de Tabelas

Tabela 1. Aplicação da hidroponia para tratamento de águas residuais e/ou produção de plantas (Fuster & Mendoza, 2022)	10
Tabela 2. Identificação de plantas que podem ser utilizadas como biofertilizantes	17
Tabela 3: Normas de qualidade da água para reutilização para rega no que se refere à CBO ₅ , SST, N _{Total} e P _{Total}	30
Tabela 4 Volumem das lamas na ETAR da Base Aérea N°5 produzidas durante o período 2018-2022.....	31
Tabela 5. Comparação dos limites de concentração de metais em lamas para aplicação em solo agrícola com os valores médios anuais observados nas lamas da ETAR da Base Aérea N.º 5 no período 2018-2022	32
Tabela 6 Comparação dos limites de concentração de <i>Escherichia coli</i> e de <i>Salmonella spp</i> em lamas para aplicação em solo agrícola com os valores médios anuais observados nas lamas da ETAR da Base Aérea N.º 5 no período 2018-2022.....	33
Tabela 7. Condições de crescimento do feijão em sistema hidropónico e em sistema de cultivo em solo/lama	36
Tabela 8. Solução Nutritiva proposta por Steiner.....	37
Tabela 9. Plano de monitorização de agua e do solo/lamas usada nos sistemas de cultivo.....	38
Tabela 10. Métodos analíticos utilizados para quantificação dos parâmetros de qualida de da água e dos solos/lamas.....	39
Tabela 11. Plano de monitorização das plantas de feijão.....	39
Tabela 12. Condições de crescimento da alface em sistema de cultivo em solo/lama, com e sem biofertilizante	41
Tabela 13. Métodos analíticos utilizados para quantificação dos parâmetros de qualidade dos substratos	43
Tabela 14. Eficiência de remoção de NO ₃ e PT, no sistema de substrato sólidos com biofertilizante.....	56

Lista de siglas e acrónimos

Não foi encontrada nenhuma entrada de índice remissivo.

AR	Água Residual
CBO ₅	Carência Bioquímica de Oxigénio ao fim de cinco dias
CQO	Carência Química de Oxigénio
EC	Condutividade Elétrica
ESTG	Escola Superior Tecnologia E Gestão
ETAR	Estação de Tratamento de Água Residual
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
GEE	Gases efeito da estufa
LSMI	Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados
NPK	Relação Azoto, Fosforo e Potássio
OD	Oxigénio Dissolvido
SMEWW	Standard Methods For The Examination Of Water & Wastewater
SN	Solução Nutritiva
SST	Sólidos Suspensos Totais
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
VLE	Valor limite de emissão

1. Introdução

1.1. Motivação científica

A controvérsia sobre o impacto das atividades humanas no meio ambiente, com efeitos significativos no sistema ambiental que sustenta as dinâmicas socioeconómicas e culturais, continua a existir a nível global. Este estudo surge da preocupação em continuar com os processos de crescimento económico, prevenindo e mitigando ao máximo os impactos ambientais sobre os ecossistemas. Dessa forma, procura-se preservar as funções dos ecossistemas para garantir que as futuras gerações possam satisfazer as suas necessidades. Com base nessa premissa, o conceito de desenvolvimento sustentável é estabelecido como um compromisso essencial para a humanidade.

Para a materialização deste conceito, é necessária a implementação de estratégias de gestão ambiental, destinadas a resolver, mitigar e prevenir os problemas ambientais, o que permitirá ao ser humano desenvolver as suas potencialidades e gerir o seu património biofísico e cultural, garantindo a sua permanência no tempo e no espaço.

Isto implica que os recursos naturais sejam geridos de forma racional; por um lado, através da implementação de medidas preventivas e, por outro, de novas tecnologias que contribuam para reduzir e corrigir o recurso afetado.

A água é um elemento estratégico que sustenta a vida e a maioria das atividades humanas (pecuária, agricultura, indústria, usos domésticos, etc.) e a sua contaminação é uma grande ameaça global que afeta a saúde humana e o ambiente. As tecnologias utilizadas atualmente em estações de tratamento de água residual estão a ser alvo de maior atenção, tendo em conta o seu impacto ambiental. Em Portugal, a reutilização da água deve ser encarada como uma oportunidade, não só para viabilizar a expansão de alguns projetos fortemente dependentes da disponibilidade hídrica, e minimizar os efeitos de secas e escassez, como também para melhorar o estado do ambiente, tanto quantitativamente, diminuindo os volumes de água captados, como qualitativamente, diminuindo a carga rejeitada, nomeadamente em zonas sensíveis. Assim, é importante estudar a viabilidade de valorização de águas residuais urbanas, nomeadamente as geradas em núcleos de atividade específicos, utilizando-as em

atividades de uso próprio, reaproveitando as águas residuais tratadas e os subprodutos do processo de tratamento, em particular as lamas.

1.2. Objetivos do estudo

A ETAR da Base Aérea N°5 de Monte Real, localizada no distrito de Leiria, foi selecionada como caso de estudo no presente trabalho. Neste caso, foi identificada a possibilidade de reutilizar as águas residuais tratadas e as lamas geradas no processo, uma vez que estes componentes têm um baixo nível de contaminação, podendo ser úteis, por exemplo, para a produção de plantas que ajudam na biofertilização dos solos. Simultaneamente, a ação das plantas na absorção de nutrientes, como azoto e fósforo, permitirão que as lamas e as águas residuais usadas na produção possam ser devolvidas ao meio natural sem afetar os ecossistemas e reduzindo a poluição ambiental.

Deste modo, o estudo desenvolvido inclui os seguintes objetivos principais:

- Avaliar a produção de espécies com potencial para a biofertilização usando a água residual tratada como substrato num sistema hidropónico simples e em lamas da ETAR;
- Avaliar a qualidade da água usada no processo hidropónico e das lamas, incluindo a remoção de nutrientes através dos bioprocessos que ocorrem durante o crescimento das plantas;
- Avaliar o potencial biofertilizante das plantas produzidas no cultivo de outras espécies.

1.3. Organização do projeto

O presente trabalho apresenta-se estruturado em 6 capítulos:

O capítulo 1, *Introdução*, justifica a pertinência do tema, apresentando o potencial de reutilização da água residual tratada e a valorização das lamas de ETAR como soluções para minimizar os impactos no solo e água.

O capítulo 2, *Circularidade dos recursos naturais*, aborda a problemática da má gestão dos recursos hídricos associados às práticas agrícolas, a necessidade de minimização dos resíduos gerados, valorizando-os em atividades subsequentes, os efeitos do uso excessivo de

fertilizantes e os benefícios da utilização de biofertilizantes (plantas) para fornecer os nutrientes necessários à melhoria das características dos solos para produção agrícola.

O capítulo 3, *Caso de Estudo: ETAR da Base Aérea N°5*, onde se descreve a Base Aérea N°5, em particular os processos e princípios de funcionamento da sua ETAR, caracterizando as águas residuais tratadas e as lamas geradas, em termos qualitativos e quantitativos.

O capítulo 4, *Materiais e métodos*, apresenta o processo metodológico aplicado ao desenvolvimento do estudo, identificando os sistemas de produção utilizados, as espécies cultivadas, as condições de crescimento testadas e os métodos usados na monitorização.

No capítulo 5, *Resultados e discussão*, apresentam-se e interpretam-se os resultados obtidos, tendo em conta os parâmetros monitorizados.

E por último, o capítulo 6, *Conclusões e sugestões para trabalhos futuros*, que reúne as principais conclusões do estudo e inclui algumas recomendações a ter em conta em trabalhos futuros.

2. Circularidade dos recursos

Uma das principais motivações para avançar em direção a uma economia circular é a crescente procura por matérias-primas e a preocupante escassez de recursos. Muitas dessas matérias-primas essenciais são finitas e, à medida que a população mundial continua a crescer, a procura por elas também aumenta (Parlamento Europeu, 2023).

A abordagem da circularidade da água representa uma nova perspectiva, que visa manter a água na economia pelo maior tempo possível e minimizar a sua transformação em resíduo. Este conceito fundamenta-se no ciclo hidrológico da água, que descreve a circulação da água entre os diversos compartimentos da hidrosfera. Estudos recentes mostram que a reutilização de águas residuais tratadas como parte da gestão sustentável dos recursos hídricos pode prolongar o uso da água em atividades humanas, contribuindo para reduzir a escassez de água e aliviar a pressão sobre os aquíferos e outras fontes naturais de água (Arnaldos, 2012; Ríos, 2021).

Assim, o tratamento de águas residuais apresenta uma vantagem dupla. Além dos benefícios ambientais e de saúde pública associados à reutilização da água e à remoção de contaminantes, pode proporcionar vantagens económicas através do aproveitamento dos seus subprodutos em diferentes setores. As lamas e o biogás podem ser aplicados na agricultura e na produção de energia, gerando receitas que podem auxiliar na cobertura dos custos operacionais e de manutenção dos serviços de abastecimento de água (Monte et al., 2016).

Deste modo, as águas residuais e as lamas não devem continuar a ser consideradas "resíduos", mas sim recursos valiosos, aplicando o princípio fundamental da economia circular, que procura minimizar o desperdício e otimizar o uso dos recursos disponíveis (Iacovidou et al., 2017).

No contexto agrícola, a utilização de águas residuais tratadas e lamas representa uma oportunidade promissora para a sustentabilidade hídrica, ambiental e económica da atividade. Estes recursos, quando adequadamente tratados e geridos, oferecem uma fonte rica em nutrientes que pode assegurar o crescimento das plantas, enriquecer o solo, e reduzir a necessidade de utilização de fertilizantes. Ao viabilizar esta utilização, não apenas é possível melhorar a eficiência da produção agrícola, mas também promover práticas mais

sustentáveis e responsáveis, tanto no âmbito da hidroponia como da agricultura tradicional (Pereira, 2019).

A procura por alternativas sustentáveis na agricultura tem levado também ao desenvolvimento e aplicação de biofertilizantes como uma solução para reduzir a dependência dos fertilizantes químicos. Além das lamas, uma fonte de nutrientes valiosa, existem outras formas de biofertilizantes que podem ser utilizadas para melhorar a fertilidade do solo e promover o crescimento das plantas. Estes incluem compostos orgânicos, vermicomposto (composto produzido por minhocas), extratos de algas, bactérias fixadoras de azoto e micorrizas, entre outros. A utilização destes biofertilizantes não só reduz o impacto ambiental associado à produção e uso de fertilizantes sintéticos, como também promove a saúde do solo, aumenta a sua capacidade de retenção de água e nutrientes, e contribui para uma agricultura mais sustentável e ecológica (Pereira, 2019).

2.1. Crescimento hidropónico de plantas

A hidroponia é considerada uma técnica de produção de alimentos eficiente e não afetada pela infertilidade do solo, que utiliza nutrientes dissolvidos na água (solução nutritiva) para o crescimento das plantas. A palavra hidropónica tem duas raízes, "hydros" que significa água e "ponos" que significa cultura (Theilig, 2015). O cultivo hidropónico é geralmente efetuado em estufas, em ambiente agrícola controlado, reduzindo o contacto com elementos desnecessários, passíveis de destruir as colheitas.

A hidroponia oferece uma alternativa para a produção de alimentos, não só em zonas com contaminação do solo e escassez de água, mas também em ambiente doméstico. As principais características desta técnica, como alternativa à agricultura tradicional, são descritas a seguir:

- Apresenta maior produtividade do que a sementeira tradicional, permitindo uma maior concentração de plantas por metro quadrado e um tempo de colheita ainda mais curto (Yanil, 2022).
- Consome muito menos água do que uma cultura no solo; nesta última, 80% da água de rega é infiltrada nas camadas inferiores do solo e a restante percentagem é evaporada, enquanto numa cultura hidropónica, a infiltração da água e grande parte da evapotranspiração é controlada, uma vez que a cultura é geralmente cultivada em áreas fechadas com elevada humidade relativa (Yanil, 2022).

- O controlo de nutrientes nos sistemas hidropónicos, bem como parâmetros como pH e alcalinidade, é mais eficaz, sendo que estes parâmetros podem ser alterados de acordo com o estágio de crescimento, tornando-se deste modo um sistema mais flexível em comparação com outros sistemas agrícolas tradicionais (Almeida, 2020).
- Menor probabilidade de doenças nas culturas, o que diminui a utilização de agroquímicos, não necessitando de rotação de culturas, como acontece na agricultura convencional, de forma a manter o terreno fértil (Almeida, 2020).
- Permite ao agricultor obter colheitas de boa qualidade e saudáveis para consumo (Yanil, 2022).
- Representa um aumento da produção de até 15-20%, em comparação com a mesma cultura no solo. Isto deve-se ao facto de as plantas estarem em condições nutricionais ideais, não apresentando gasto de energia significativo na absorção radicular. Além disso, não existem problemas de bloqueio ou antagonismo entre nutrientes, otimizando todo o potencial produtivo das culturas (Yanil, 2022).

A urgência em repensar a gestão da água na agricultura reflete-se na crescente procura por práticas mais sustentáveis e eficientes. A escassez hídrica global e a preocupação com sua disseminação intensificam a necessidade de otimizar o uso de recursos hídricos em todas as atividades, desde domésticas até agrícolas (Almeida, 2020). Neste contexto, a reutilização de águas residuais tratadas e lamas emerge como uma solução viável e promissora.

A gestão eficiente da água na agricultura passa pela incorporação de práticas que minimizem o consumo e maximizem a eficácia dos recursos. As águas residuais tratadas, frequentemente subestimadas, representam uma fonte rica em nutrientes essenciais para as plantas. Quando utilizadas em sistemas hidropónicos, estas águas podem fornecer nutrientes como fósforo (P), azoto (N) e outros macronutrientes vitais para o desenvolvimento das culturas (Fuster & Caro, 2020).

A aplicação destes sistemas hidropónicos, que utilizam água residual como fonte nutritiva, não só reduz a necessidade de águas de fontes naturais, como também contribui para a qualidade do solo e a saúde das plantas. Além disso, este processo tem potencial para atuar como um tratamento complementar às Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), ajudando na remoção de poluentes através de uma combinação eficaz de processos físicos, biológicos e químicos (Haddad & Mizyed, 2011).

Para garantir a eficácia deste método, é crucial manter um equilíbrio preciso de condições físico-químicas. As interações entre bactérias, raízes das plantas, substratos como a gravilha, e condições ambientais como a luz solar, são fundamentais para o processo de purificação das águas residuais. Através de processos como nitrificação e desnitrificação, o sistema radicular das plantas desempenha um papel vital, aprimorando o tratamento biológico e transformando poluentes em nutrientes benéficos para as plantas (Fuster & Caro, 2020).

Assim, ao integrar a reutilização de águas residuais tratadas e lamas na agricultura através de sistemas hidropónicos, não só é possível avançar na gestão sustentável da água, como também se promovem práticas agrícolas mais eficientes e amigas do ambiente. Esta abordagem alinha-se a uma visão de economia circular, onde os resíduos são transformados em recursos valiosos, contribuindo para uma agricultura mais resiliente e sustentável.

Na hidroponia, o controle preciso de parâmetros físicos e químicos é essencial para garantir o crescimento saudável das plantas. Alguns dos parâmetros mais importantes são: pH, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Temperatura (T), Oxigénio Dissolvido (OD), os macronutrientes: azoto (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S); e os micronutrientes: zinco, ferro, manganês, cobre, molibdénio, boro (Monte et al., 2016).

O pH da solução nutritiva deve ser mantido em valores que garantam a absorção adequada de nutrientes pelas plantas. Quando o pH é demasiado baixo (< 6,0), os nutrientes são dissolvidos rapidamente, o que resulta num excesso de nutrientes para a planta; quando o pH é elevado (>6,5), ocorre o efeito contrário, verificando-se uma baixa dissolução de nutrientes (fenómenos de precipitação), podendo levar a deficiências de nutrientes, o que impacta no. A gama ideal varia entre 5,5 e 6,5 (Castillo et al., 2014).

A condutividade elétrica é um parâmetro crucial nos sistemas hidropónicos, exercendo um papel vital na saúde e no crescimento das plantas. Os valores adequados de cada cultura e das condições ambientais. Manter a condutividade dentro dos intervalos recomendados assegura uma aplicação eficiente dos nutrientes, promovendo assim um desenvolvimento saudável das plantas. Em hidroponia, os valores comuns de condutividade elétrica (EC) variam de acordo com a planta cultivada. Para culturas comuns, como alface, os valores ideais estão entre 1,2 a 1,8 mS/cm; para tomate, entre 2,0 a 5,0 mS/cm; pepino, entre 1,7 a 2,5 mS/cm; ervas aromáticas como manjerição, entre 1,0 a 1,4 mS/cm; e morango, entre 1,0 a 1,4 mS/cm. Para o cultivo de feijão em hidroponia, recomenda-se manter a condutividade

elétrica entre 1,8 a 2,4 mS/cm, assegurando assim que as plantas recebam a quantidade ideal de nutrientes para um crescimento robusto e saudável (Amaya & Cruz, 2016).

Os sólidos dissolvidos totais são importantes nos sistemas hidropônicos porque representam a quantidade total de compostos dissolvidos orgânicos e inorgânicos na solução nutritiva. A monitorização dos SDT permite avaliar a concentração de nutrientes na solução, garantindo que as plantas recebam os nutrientes necessários para um crescimento saudável. Além disso, um aumento nos SDT pode indicar uma acumulação excessiva de sais ou outros compostos, o que pode ser prejudicial para as plantas (Castillo et al., 2014).

A temperatura da solução nutritiva influencia a absorção de nutrientes pelas plantas. Geralmente, a gama ideal varia entre 18 °C e 22 °C, mas pode variar de acordo com a cultura (Castillo et al., 2014). Também tem impacto na quantidade de oxigénio dissolvido; temperaturas muito elevadas (acima de 35 °C) ou muito baixas (menos de 16 °C), representam um fator limitante, associado à deficiência de oxigénio nas raízes, o que poderá causar problemas significativos no metabolismo da planta.

A oxigenação adequada da solução nutritiva é crucial para o crescimento das raízes. A falta de oxigénio pode levar a problemas, tais como o apodrecimento das raízes. É recomendada a operação a valores de OD ≥ 3 mg O₂/L (Fonseca & Sousa, 2021).

Os macronutrientes, azoto (N), fósforo (P), potássio (K) são essenciais para o crescimento geral da planta. A concentração específica pode variar em cada uma das fases de crescimento da planta (Beltrano & Gimenez, 2015). A relação azoto, fósforo, potássio (NPK) é crucial em diferentes estágios de crescimento (Patten, 2012). O cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) são elementos cruciais para o desenvolvimento dos tecidos e processos bioquímicos das plantas. Na nutrição hidropónica, recomenda-se manter os níveis de cálcio entre 150 e 200 ppm, magnésio entre 25 e 50 ppm e enxofre entre 50 e 100 ppm. Esses valores podem variar conforme a espécie da planta e as condições específicas de crescimento, sendo fundamental ajustar esses níveis de acordo com as necessidades da planta em cada fase de desenvolvimento para garantir um crescimento saudável e uma produção ideal (Beltrano & Gimenez, 2015).

Os micronutrientes, zinco, ferro, manganês, cobre, molibdénio e boro são necessários em quantidades menores, mas são vitais para funções metabólicas específicas (Beltrano, 2015).

Para além da quantidade adequada ao crescimento das plantas, que pode variar consoante a espécie, é importante garantir uma proporção adequada entre os vários iões e nutrientes, para evitar deficiências ou excesso, que levará a problemas de produtividade e toxicidade nas plantas (Patten, 2012). Também é importante garantir que os nutrientes estão completamente dissolvidos na solução para evitar a obstrução do sistema e garantir uma distribuição uniforme.

Na tabela 1 são apresentados diversos estudos científicos que envolvem a reutilização de águas residuais na hidroponia. Esses trabalhos identificam mecanismos específicos e variedades de plantas capazes de descontaminar águas provenientes de fontes industriais e domésticas, incluindo aquelas contaminadas por metais. Os resultados dessas pesquisas demonstram a eficácia do método hidropónico na descontaminação de águas residuais, evidenciando sua viabilidade na obtenção de produtos agrícolas, consolidando-se como uma abordagem sustentável.

Tabela 1. Aplicação da hidroponia para tratamento de águas residuais e/ou produção de plantas (Fuster & Mendoza, 2022).

Autor	País	Breve descrição do estudo	Tipo de AR	Contaminante chave	Tipo de Planta	Efeito da utilização da AR nas plantas	Efeito das plantas na remoção dos contaminantes	Mecanismo envolvido na remoção dos contaminantes
Akeem, 2018	Arábia Saudita	Fito-remediação em sistema hidropónico para eliminar Cd, Pb e N	Águas residuais domésticas	Metais (Cd, Pb)	Cana-de-cabeira (<i>Arundo donax</i>)	As águas residuais domésticas não afetaram o crescimento das plantas.	A eliminação de metais atingiu 89%.	Fito estabilização, através de mecanismos específicos, como a produção de compostos antioxidantes pelas plantas. Absorção nas raízes e na parte aérea da planta.
Burger, 2019	Áustria	Absorção do Cs e Sr usando plantago em hidroponia	Águas residuais industriais	Metais (Sr) e nutrientes (Cs)	Plantago (<i>Plantago major</i>)	Degradação da clorofila, resultando em folhas amareladas (clorose) e menor eficiência fotossintética.	Grande potencial do plantago na eliminação de Cs e Sr, podendo ser eventualmente útil para a remoção de outros poluentes.	Mecanismos antioxidantes. Absorção no tecido vegetal.
Chekli, 2017	China	Uso de águas residuais como fertilizante para o cultivo hidropónico de alface	Águas residuais de aquicultura	Metais (Cd) e Nutrientes (P, N, Mg, Ca, K)	Alface, (<i>Lactuca sativa</i>)	O sistema hidropónico com AR revelou-se uma prática que melhora o crescimento e a produtividade das plantas, além de reciclar nutrientes e reduzir custos.	Absorção muito eficiente de nutrientes ($\approx 100\%$).	Absorção pelas plantas.
Lee, Ranjan, & Bae, 2021	Brasil	Reutilização de águas residuais produção hidropónica de alface	Águas residuais domésticas	Nutrientes (P, N, K, Ca, Mg, Na)	Alface, (<i>Lactuca sativa</i>)	O crescimento das folhas é maior, com folhas de alta qualidade, mais vigorosas e saudáveis, apresentando menor suscetibilidade a pragas e doenças.	Absorção eficiente de nutrientes, atingiu 92%	Absorção de nutrientes nas raízes da planta.
Melheios, Rolim & Silva, 2012	Chile	Cultivo hidropónico de tomate cereja em AR de uma indústria de alimentar, previamente tratada	Águas residuais de uma indústria alimentar, previamente tratada	Nutrientes (P, N, S) e Micronutrientes (Zn, Bo, Fe)	Tomate, (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Os frutos apresentam boa qualidade, com um crescimento foliar equilibrado e saudável. Além disso, há um aumento na produção de frutos.	Redução rápida da concentração de nutrientes (N e P) na água residual; atingiu os limites permissíveis para os micronutrientes	Absorção de nutrientes nas folhas da planta.

Não obstante as vantagens apontadas, há que acautelar eventuais aspetos negativos da reutilização de águas residuais tratadas, como a presença de contaminação microbiológica e de substâncias potencialmente tóxicas, como os metais, que podem pôr em causa a qualidade das plantas produzidas. De acordo com o Decreto-Lei n.º 119/2019, que estabelece as normas relativas à reutilização de águas residuais tratadas, existem várias restrições e condições que devem ser observadas para garantir a segurança e a sustentabilidade no uso dessas águas. Embora o decreto-lei não faça referência direta à hidroponia, é importante destacar que a reutilização de águas residuais tratadas está sujeita a normas rigorosas, especialmente no que diz respeito à rega de culturas, pressupondo-se que possa ser imposta uma exigência similar no caso do cultivo hidropónico.

A água reutilizada deve cumprir os critérios de qualidade estabelecidos para o tipo de uso pretendido, abrangendo parâmetros microbiológicos e químicos. Isso é essencial para prevenir a contaminação das culturas e garantir a segurança alimentar. A qualidade da água reutilizada deve ser monitorizada regularmente para assegurar a conformidade com os padrões estabelecidos. Esta monitorização deve ser devidamente documentada, e os resultados devem estar disponíveis para inspeção pelas autoridades competentes.

As práticas de reutilização de águas residuais tratadas devem também assegurar a proteção da saúde pública e do meio ambiente. Isto inclui a implementação de medidas adequadas de higiene e segurança durante a aplicação da água, de modo a garantir que não haja riscos para os trabalhadores agrícolas e para os consumidores. A rega com água reutilizada deve ser realizada utilizando técnicas que minimizem o contacto direto da água com a parte comestível das culturas, sempre que possível. Isto é particularmente importante para culturas que são consumidas cruas, a fim de reduzir o risco de contaminação.

2.2. Crescimento de plantas em lamas de ETAR

A agricultura, enquanto atividade ancestral e fundamental para a sobrevivência humana, desempenha um papel crucial na alimentação das populações. Contudo, ao avaliar esta prática sob diferentes perspetivas, económica, social e ambiental, surgem preocupações significativas.

Desde a Revolução Verde, a agricultura intensificou-se, levando a um uso excessivo de combustíveis fósseis e de produtos químicos. A aplicação massiva de agrotóxicos provoca a contaminação dos solos, água e ar e dos alimentos. Além disso, eventos climáticos extremos,

como aumento da temperatura, chuvas intensas ou secas prolongadas, têm causado impactos negativos nas culturas, resultando em perdas irrecuperáveis para os agricultores (Souza & Araújo, 2019).

Viera-Arroyo et al. (2020) destaca que “a agricultura é responsável por 13% das emissões globais de gases com efeito de estufa (GEE), percentagem que pode aumentar para 30-40% com práticas insustentáveis”. Esta visão salienta a urgência de abordar os problemas de insustentabilidade e desigualdade social na produção alimentar.

As desvantagens da agricultura tradicional são evidentes e impactantes, nomeadamente:

- Degradação do solo: O cultivo repetido das mesmas culturas esgota os nutrientes do solo, deteriorando a sua qualidade. Práticas como a monocultura e a lavoura intensiva aumentam a erosão do solo, exigindo o uso contínuo de agroquímicos.
- Perda de biodiversidade: A concentração da produção apenas em algumas culturas diminui a diversidade biológica, podendo levar à extinção de espécies e a desequilíbrios nos ecossistemas.
- Uso intensivo de agroquímicos: A necessidade de combater pragas e aumentar a produtividade resulta na utilização excessiva de pesticidas e fertilizantes químicos, com impactos negativos na saúde e no ambiente.
- Impacto na água: A irrigação inadequada e a gestão deficiente da água levam ao esgotamento dos recursos hídricos. Esta prática, aliada à contaminação da água por produtos químicos, agrava ainda mais a situação.
- Vulnerabilidade às alterações climáticas: A dependência de monoculturas torna a agricultura tradicional mais vulnerável a variações climáticas e eventos extremos.
- Desigualdade no acesso aos recursos: As grandes empresas e proprietários de terras são frequentemente beneficiados, em detrimento dos pequenos agricultores e comunidades locais, ampliando as desigualdades sociais e económicas (Nieto et al., 2011).

Face aos desafios apresentados pela agricultura tradicional, é imperativo repensar e procurar alternativas que promovam uma abordagem mais sustentável, equitativa e benéfica para o planeta e para as futuras gerações. Neste contexto, surgiram diversos sistemas agrícolas alternativos, destacando-se a agricultura biológica e a agricultura sustentável. Ambas as abordagens são baseadas em métodos de produção que incluem:

- A boa gestão dos solos, que envolve a rotação de culturas, adubação orgânica, adubação química equilibrada, práticas conservacionistas, e gestão integrada de pragas e de doenças, através da utilização de organismos benéficos, da rotação de culturas e de meios mecânicos.
- A reutilização de águas residuais para irrigação.
- A fertilização orgânica recorrendo a detritos de animais e vegetais, a águas residuais, a lamas, entre outros.

A utilização de lamas provenientes de estações de tratamento de águas residuais é frequente em sistemas sustentáveis, de modo a reduzir a utilização e o consumo de fertilizantes e produtos químicos nocivos para o solo e para a água (Sánchez, 2015).

As lamas de depuração de ETAR urbanas, resíduos resultantes do tratamento de águas residuais domésticas e industriais equiparadas, apresentam um potencial significativo para serem reintegradas na agricultura de forma sustentável. Com uma composição rica em matéria orgânica, azoto, fósforo, entre outros nutrientes, estas lamas são uma fonte valiosa para a fertilização e correção de solos em plantações florestais, contribuindo para a sua valorização (Zabotto et al., 2019).

Estudos realizados no Brasil demonstram a viabilidade e os benefícios da utilização de lamas de depuração para a produção de diferentes culturas hortícolas e espécies florestais. Uma das principais vantagens reside no enriquecimento do solo com nutrientes, corretivo agrícola, cuja função principal é a de melhorar as características físicas, químicas e/ou, biológicas do solo, com vista ao bom desenvolvimento das plantas (Zabotto et al., 2019).

A libertação gradual de nutrientes orgânicos das lamas favorece a sua absorção pelas plantas e reduz os riscos de contaminação ambiental. Adicionalmente, contribui para o aumento do teor de matéria orgânica e capacidade de troca catiónica do solo, melhorando as suas características químicas e biológicas (Malta, 2001).

A composição das lamas em azoto e fósforo é de especial importância. O azoto é fundamental para o crescimento vegetal e para a biodiversidade do solo. Ao utilizar lamas, é importante garantir a sua eficiente aplicação para minimizar perdas por percolação, volatilização, desnitrificação e arraste superficial. Com a decomposição das lamas, o azoto orgânico converte-se em amónia ou azoto amoniacal, e este, em nitrato, em meio oxidante.

Embora os coloides do solo possam reter a amónia, o nitrato tem maior probabilidade de ser lixiviado para fora da zona radicular das plantas. Em condições redutoras, ocorre a desnitrificação, transformando o azoto em azoto gasoso. É vital manter um equilíbrio de azoto no solo, uma vez que o excesso pode contaminar as águas subterrâneas, sendo um parâmetro de monitorização fundamental em áreas de aplicação das lamas (Bettiol & Camargo, 2006).

Em relação ao fósforo, o risco de toxicidade para as plantas é praticamente nulo. No entanto, é essencial considerar o arraste deste elemento por erosão superficial, que pode resultar em eutrofização das águas superficiais (Bettiol & Camargo, 2006).

Apesar dos benefícios apontados para a aplicação de lamas no solo, é crucial estar atento aos eventuais riscos ambientais e para a saúde devido à presença de elementos potencialmente tóxicos, como zinco, cobre, níquel, cádmio e chumbo, presentes em algumas lamas, muito em particular as de origem industrial, exigindo por isso um planeamento e monitorização cuidadosos da sua aplicação (Meneses, 2023).

As lamas geradas a partir do tratamento de águas residuais urbanas podem conter microrganismos patogénicos, como coliformes fecais, salmonela, vírus e helmintos. Estes podem ser reduzidos com tratamentos adequados, mas é necessário monitorizar a presença desses organismos na lama e no solo onde é aplicado (Hazel, 2015).

Existem normas específicas que estabelecem concentrações máximas permitidas de metais nas lamas, bem como limites de acumulação no solo, garantindo uma utilização segura na agricultura.

O Decreto-Lei n.º 276/2009, de 2 de outubro, define os limites dos parâmetros microbiológicos, como salmonela (ausente em 25 g de amostra) e *Escherichia coli* (*E. coli*) (menos de 1000 UFC/g), para garantir a segurança sanitária. Este decreto também estabelece limites para metais, como cádmio, cobre, níquel, chumbo, zinco, mercúrio e crómio, de modo a prevenir a contaminação, e teor de nutrientes aplicáveis ao solo, como azoto (N) e fósforo (P), para evitar a poluição das águas superficiais e subterrâneas por lixiviação.

Além disso, o Decreto-Lei n.º 118/2006, de 21 de junho, estabelece as regras para a gestão e utilização agrícola de lamas de depuração, incluindo monitorização da qualidade, aplicação e gestão. É crucial o cumprimento rigoroso dos Decreto-Lei n.º 276/2009 e n.º 118/2006, e outros documentos relevantes, para garantir uma utilização segura e sustentável das lamas

de depuração na agricultura. A monitorização contínua dos parâmetros microbiológicos e do teor de metais, juntamente com o controlo das concentrações de nutrientes no solo, são medidas fundamentais para proteger a saúde pública e o meio ambiente. Além disso, minimizam os riscos de contaminação do solo e da água, contribuindo para uma agricultura mais segura e ecológica.

2.3. Biofertilizantes vs. fertilizantes tradicionais

A agricultura convencional assenta no uso de fertilizantes minerais solúveis para maximizar o rendimento das culturas. A aplicação excessiva de fertilizantes tem gerado diversos problemas ambientais e ecológicos, como eutrofização das águas superficiais, contaminação das águas subterrâneas, poluição atmosférica, degradação do solo, desequilíbrios biológicos e redução da biodiversidade. No solo, em particular, além das alterações no pH, observa-se a deterioração da sua estrutura e um impacto significativo na microfauna. Tendo em conta o referido, são fundamentais práticas agrícolas mais sustentáveis e conscientes (Ulibarry, 2019).

O consumo total de fertilizantes é bastante elevado, por exemplo no ano de 2014/2015, foi de 181,9 milhões de toneladas, dos quais, 102,5 milhões de toneladas de azoto, 45,9 milhões de toneladas de fósforo e 33,5 milhões de toneladas de potássio (Ulibarry, 2019).

O azoto é essencial para a produtividade agrícola, presente nas plantas em enzimas, proteínas, ADN e clorofila. No entanto, quando em excesso, pode causar problemas como eutrofização, acidificação e toxicidade do meio.

A figura 1 representa os países mais afetados pelo impacto da agricultura.

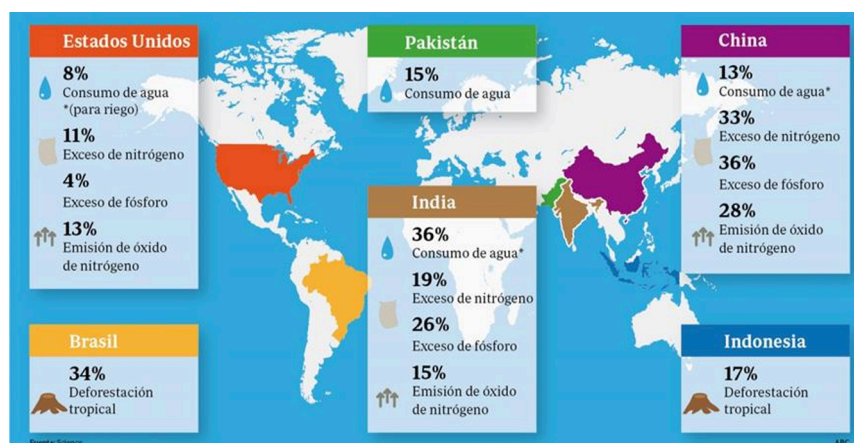


Figura 1. Impacto da agricultura no meio ambiente (Oliva, 2017).

As últimas previsões da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) indicam que, em 2050, a população mundial será de 9,1 mil milhões de pessoas. Por outro lado, o aumento da superfície agrícola é limitado. Por conseguinte, é necessário manter e aumentar os rendimentos das culturas, utilizando técnicas que permitam praticar uma agricultura produtiva, aplicando simultaneamente critérios de desenvolvimento sustentável (Oliva, 2017).

Diante desses desafios ambientais, surge a oportunidade de explorar o uso de biofertilizantes na agricultura. Os biofertilizantes, fertilizantes orgânicos derivados de fontes naturais, oferecem uma alternativa sustentável aos fertilizantes químicos convencionais. Além de fornecer os nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, os biofertilizantes também promovem a melhoria da qualidade do solo e contribuem para o estabelecimento de um ambiente microbiológico equilibrado e natural. Em comparação com os fertilizantes químicos, os biofertilizantes têm a vantagem adicional de aumentar a biomassa do solo, o que ajuda a prevenir a erosão hídrica, mantém a humidade e limita o crescimento de ervas daninhas. Essa abordagem holística promove a sustentabilidade agrícola, e contribui também para a preservação dos recursos naturais e a saúde dos ecossistemas agrícolas (Mahapatra et al., 2022).

Exemplos de plantas que podem ser usadas como biofertilizantes são as pertencentes à família das leguminosas (plantas fixadoras de azoto), como as ervilhas, grão-de-bico, feijão, alfafa, soja e fava; as gramíneas, como o trigo, aveia ou centeio; e as crucíferas, como o nabo, couve, brócolos e couve-flor (FAO, 2002).

São geralmente plantas de crescimento rápido, bem-adaptadas à alteração dos parâmetros químicos do solo, e que fixam eficazmente os nutrientes, como azoto (Rebelo, 2015). Na tabela 2 descrevem-se algumas das plantas que podem ser utilizadas como biofertilizantes, indicando a sua utilização corrente no âmbito da melhoria da qualidade do solo.

Tabela 2. Identificação de plantas que podem ser utilizadas como biofertilizantes.



Planta	Família	Características físicas e de crescimento	Utilização corrente na melhoria da qualidade do solo	Imagem
Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)	Planta perene nativa da Índia, pertencente à família <i>Poácea</i> (gramíneas).	Planta de crescimento rápido (brota dentro de uma semana), desenvolvendo-se a uma temperatura na gama -14 °C a 46 °C, altitude entre 0 e 2800 m, e pH entre 3 e 12,5; também se adapta a solos sódicos, salinos ou alcalinos e a solos e águas contendo alumínio, arsênico, cádmio, cobre, crômio, chumbo, manganês, mercúrio, níquel, selênio e zinco (Srivastava, 2008).	As raízes desempenham um papel crucial no reforço da resistência do solo à erosão, contribuindo para um aumento significativo (30-40%) na sua capacidade de resistir ao desgaste. Além disso, a folhagem, caracterizada pela postura ereta, altura substancial e abundância, demonstra uma robustez igualmente notável. Quando utilizada na criação de barreiras, essa vegetação é capaz de enfrentar águas de inundação com profundidades de até 80 cm, reduzindo sua velocidade a praticamente zero. Ao mesmo tempo, desempenha um papel crucial na retenção de sedimentos, fortalecendo ainda mais sua eficácia na preservação do solo (Srivastava, 2008).	
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	Planta herbácea, da família <i>Fabáceas</i> (leguminosas).	A alfalfa (<1m de altura) destaca-se por folhas pequenas e verdes brilhantes, flores azuis ou violetas e frutos em forma de vagem. O seu crescimento é favorecido por temperaturas entre 28 e 30 °C, com germinação possível a partir de 2 ou 3°C. Temperaturas excessivamente elevadas, acima de 38 °C, podem resultar na morte das plantas (Jaimes, 2020). A principal limitação para o seu desenvolvimento está relacionada com a acidez do solo, embora possa germinar em pH até 4,0. A planta é altamente sensível à salinidade, o que pode resultar em desequilíbrios entre o sistema radicular e a parte aérea (Keni Cota-Ruiz, 2019).	É uma planta altamente nutritiva, rica em proteínas, minerais e vitaminas. Além disso, a alfafa forma uma associação simbiótica com bactérias fixadoras de azoto no solo, o que aumenta a disponibilidade desse nutriente para a cultura. O seu cultivo contribui para a redução da erosão do solo e auxilia no controle de pragas e doenças que afetam outras culturas (Keni Cota-Ruiz, 2019).	

Tabela 3. Identificação de plantas que podem ser utilizadas como biofertilizantes (cont.)





Planta	Família	Características físicas e de crescimento	Utilização corrente na melhoria da qualidade do solo	Imagem
Feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Planta da família <i>Fabáceas</i> (leguminosas).	Cresce até atingir uma altura de 50 a 70 cm, com um sistema radicular composto por uma raiz principal pivotante e várias ramificações. O seu fruto é uma vagem ligeiramente curva, que se abre naturalmente quando maduro. Essas vagens podem variar em comprimento de 10 a 12 cm e apresentar coloração verde, roxa ou quase preta. A temperatura ideal para o desenvolvimento da cultura do feijão situa-se entre 10 °C e 27 °C. O intervalo adequado do pH do solo varia de N-NKT embora seja possível cultivá-lo em solos com pH entre 4,5 e 5,5 (Kohashi, García, & Aguilar, 2017).	A presença do feijoeiro em sistemas agrícolas é benéfica, não apenas pela sua produção de alimento, mas também pelos benefícios que traz à saúde do solo. Uma das características mais interessantes do feijoeiro é a sua capacidade de fixar azoto atmosférico em simbiose com bactérias do género <i>Rhizobium</i> , presentes nos seus nódulos radiculares. Esta fixação de azoto é uma forma natural e sustentável de enriquecer o solo com um nutriente essencial, sem a necessidade de adição de fertilizantes nitrogenados (Kohashi, García, & Aguilar, 2017).	
Pasto Kikuyo (<i>Pennisetum clandestinum</i>)	Planta pertencente à família <i>Poácea</i> (gramíneas).	Requer solos bem drenados ou moderadamente drenados, com altitudes variando de 1600 a 3000 metros acima do nível do mar. Prefere temperaturas entre 10 °C e 18 °C e demonstra moderada tolerância à sombra. Adequada para níveis de precipitação anual acima de 800 a 2800 mm, e mostra alguma tolerância à seca. Pode ser cultivada em solos com um pH baixo ($\approx 4,5$), elevado teor de magnésio e alumínio, e salinidade moderada. (Filippi, 2018).	É uma opção versátil para a recuperação de solos degradados. Destaca-se pela capacidade de filtrar e acumular metais pesados, auxiliando na descontaminação do solo. Além disso, as suas raízes densas estabilizam o solo, prevenindo a erosão, especialmente em áreas compactadas. Ao crescer, o pasto Kikuyo adiciona matéria orgânica, enriquecendo o solo e melhorando a sua estrutura, o que facilita a infiltração da água e equilibra os nutrientes. Esta gramínea também é resistente a pragas e doenças, promovendo um cultivo mais sustentável e reduzindo a necessidade de produtos químicos que podem prejudicar o solo (Filippi, 2018).	

Tabela 4. Identificação de plantas que podem ser utilizadas como biofertilizantes (*cont.*)

Planta	Família	Características físicas e de crescimento	Utilização corrente na melhoria da qualidade do solo	Imagem
Trevo (<i>Trifolium repens</i>)	Planta da família <i>Fabáceas</i> (leguminosas).	Em comparação com outros trevos, esta variedade vegetal é 2 a 4 vezes maior. Requer solos bem drenados, altamente férteis, de textura média a pesada, com pH entre 5,0 e 7,5. É cultivado em altitudes que variam de 2000 a 3000 metros acima do nível do mar. Adapta-se bem a temperaturas entre 10 °C e 20 °C, e mostra tolerância a altos níveis de nebulosidade. A precipitação anual deve fixar-se na faixa de 800 a 1600 mm (Filippi, 2018).	O trevo branco melhora o solo ao fixar azoto nos nódulos nas suas raízes. Os caules rastejantes ajudam a controlar a erosão (Filippi, 2018).	
Ervilhaca (<i>Pisum sativum</i>)	Planta da família <i>Fabáceas</i> (leguminosas).	Em condições ótimas de temperatura e humidade, as sementes germinam em 1 semana. A ervilhaca é uma planta que tolera a acidez, podendo desenvolver-se muito bem em solos com um pH de 5,5 a 6,8 (Infoagro, 2003; Inat-Corpoica, 2000 citado por Buitrago, et al., 2006).	Apesar de não ser tão popular quanto outras plantas fixadoras de azoto, a ervilhaca é altamente eficaz nessa função. Pode ser incorporada no solo no final da estação de crescimento (Prieto, 2008).	

3. Caso de Estudo: ETAR da Base Aérea N° 5 em Monte Real

O caso de estudo foi desenvolvido em colaboração com o setor do Ambiente da Base Aérea N° 5 de Monte Real.

A Base Aérea N.º 5 foi inaugurada em 4 de outubro de 1959, ocupa uma extensão de 482 hectares do território nacional, encontrando-se localizada na Serra Porto de Urso, na localidade da Freguesia de Monte Real (figura 2), concelho de Leiria. Fundada sobre o aquífero Vieira de Leira, Marinha Grande, em 1959, a base passou por diversas intervenções de expansão ao longo dos anos até alcançar as dimensões atuais. Com seis décadas de história, a Base Aérea sempre teve como principal missão a defesa aérea, operando uma variedade de meios aéreos, incluindo os F-86F Sabre, Fiat G.91, T-33, T-38, A-7P Corsair II e os F-16 Fighting Falcon, que são as aeronaves em operação atualmente. Essa instalação militar opera de forma ininterrupta, 24 horas por dia, todos os dias do ano, garantindo a prontidão dos meios aéreos dedicados à defesa aérea do território nacional (Base Aérea N°5, 2019).

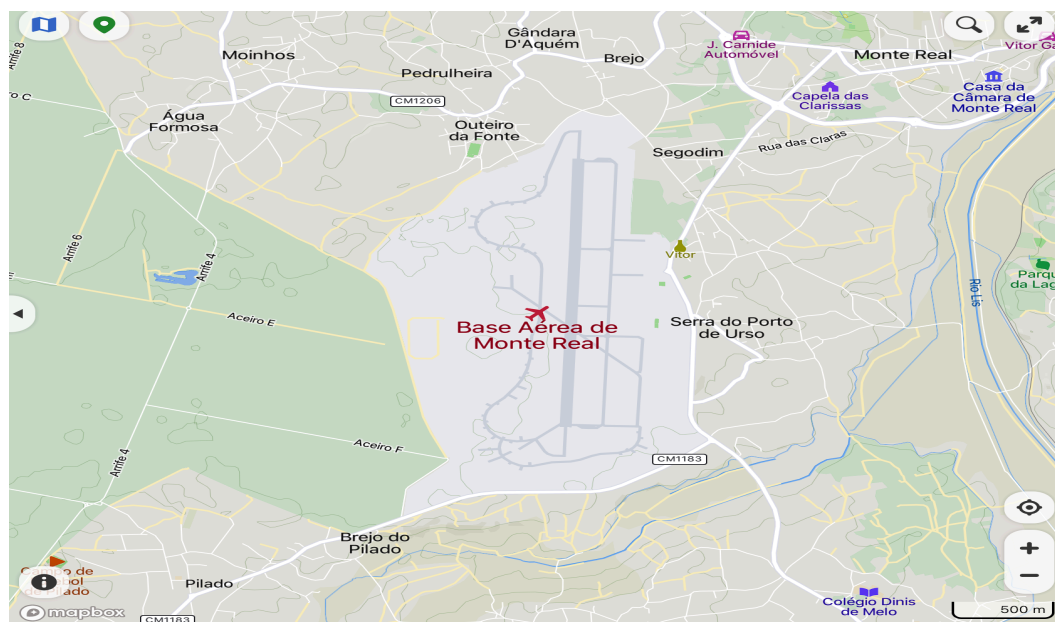


Figura 2. Dados geográficos e localização da Base Aérea N°5 Monte Real (Base Aérea N°5, 2019).

A Base Aérea N.º 5 é composta por diversas infraestruturas, destacando-se a zona de aeródromo e diversos edifícios e equipamentos de apoio necessários.

A população residente da Base Aérea N.º 5 tem vindo a diminuir, contando com cerca de 700 pessoas, entre militares e civis (dados de 2019). No entanto, a população presente nas instalações apresenta variações significativas ao longo do ano devido a atividades específicas, como o Dia da Defesa Nacional, eventos na Unidade e exercícios com forças militares estrangeiras, atingindo valores superiores, em curtos períodos de tempo (Rocha, 2020).

A origem da água potável na Base Aérea N.º 5 é de três poços localizados nas suas instalações, não estando dependente de fornecimento externo. Na sequência de uma extensa obra de reabilitação da rede de abastecimento, a Base Aérea N.º 5 conseguiu reduzir o consumo de água nas instalações a partir de 2018, tendo sido estimado um consumo anual de 65 755 m³ e de 67 156 m³, em 2018 e 2019, respetivamente. O uso da água está associado à utilização em atividades da população residente e não residente, a atividades de manutenção (lavagem de aeronaves, hangares, veículos e equipamentos) e rega (Rocha, 2020).

As águas residuais geradas são tratadas numa Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) própria, que foi projetada em 2016 para atender a uma população equivalente de 3000 habitantes. Segundo o estudo de Rocha (2020), esta ETAR encontra-se sobredimensionada face à situação atual. A figura 3 apresenta os volumes tratados no período 2018 – 2022, observando-se um caudal médio anual tratado de 3115 m³/ano no período em análise. Os dados fazem parte integrante dos relatórios de monitorização da ETAR da Base Aérea N.º 5.

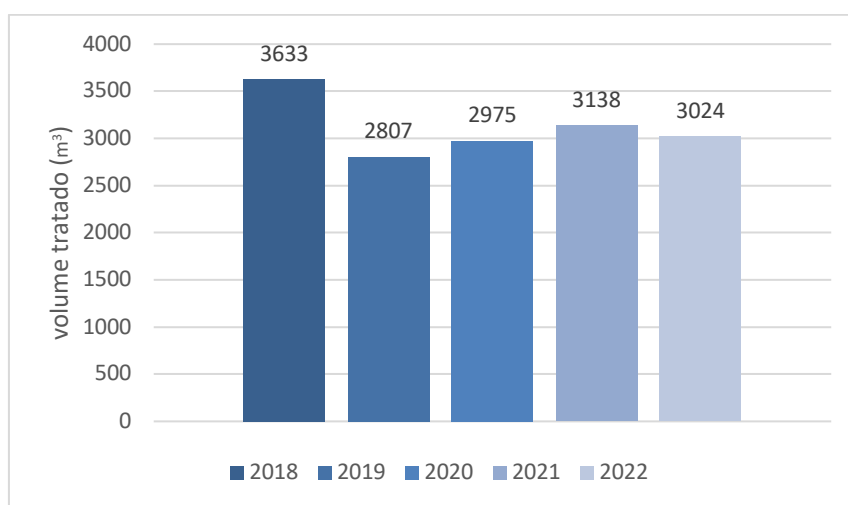


Figura 3. Volumes anuais tratados na ETAR da Base Aérea N.º 5 Monte Real no período 2018 a 2022.

A ETAR da Base Aérea N ° 5 encontra-se obrigada a respeitar as condições de descarga de águas residuais de acordo com o Decreto-Lei nº236/98, de 1 de agosto e o Decreto-Lei nº152/97, de 19 de junho.

A ETAR incluí duas fases de tratamento, nomeadamente o tratamento da fase líquida e o tratamento da fase sólida (figura 4). No tratamento da fase líquida, a água residual é submetida a tratamento preliminar, passando por um tamisador/compactador, para remoção dos sólidos mais grosseiros afluentes à estação, protegendo, desta forma, os órgãos e equipamentos que se encontram a jusante e aumentando a eficiência global da ETAR. Na obra de entrada existe um canal de recurso, com grade de limpeza manual, que funciona em alternativa ao canal principal, sempre que se procede a ações de manutenção ou limpeza do tamisador. Os sólidos recolhidos nesta fase são armazenados num contentor e encaminhados para destino final adequado. Existe ainda um canal de “bypass” que, em situações excecionais, devidamente documentadas, conduz o efluente diretamente para o meio recetor.

A etapa seguinte é o tratamento secundário, no qual a água residual passa por um sistema de lamas ativadas de baixa carga para a remoção de matéria orgânica biodegradável em condições aeróbias. Em seguida, passa por um decantador secundário, que separa as lamas geradas da água residual tratada. O tanque de arejamento é equipado com dois arejadores de superfície, fornecendo a quantidade necessária de ar para a oxidação e homogeneização da água e da biomassa. Para garantir a concentração adequada de sólidos biológicos no tratamento, uma parte das lamas recolhidas no decantador é recirculada para o tanque de arejamento. A água tratada é utilizada em várias operações de manutenção que requerem a utilização de água, incluindo a lavagem de aeronaves, hangares de manutenção, abrigos meteorológicos, veículos e equipamento de terra, e irrigação.

No tratamento da fase sólida, as lamas geradas no processo biológico são direcionadas para um espessador gravítico e, posteriormente, para a desidratação em filtro de bandas, visando a concentração dos sólidos (Rocha, 2020). As lamas desidratadas são armazenadas em grandes sacos junto à estação ETAR.

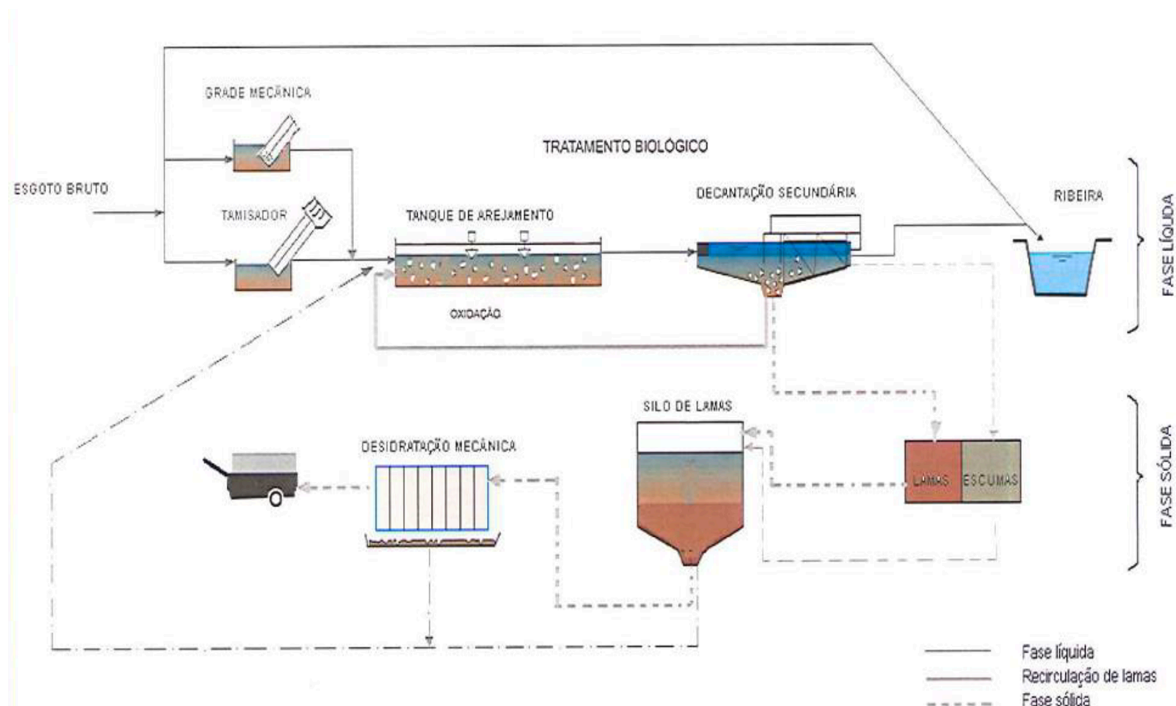


Figura 4. Diagrama linear da ETAR da Base Aérea N° 5 (Rocha, 2020).

3.1. Caracterização das águas residuais da ETAR da Base Aérea N°5

A análise do funcionamento da ETAR da Base Aérea N°5 ao longo do tempo é essencial para avaliar o potencial de reutilização das águas tratadas e das lamas geradas no processo, num contexto de produção agrícola, identificando padrões e eventuais anomalias nos caudais afluentes e tratados, e nas lamas geradas. Na figura 5, podem-se observar os caudais mensais tratados durante os anos de 2018 a 2022, período de referência assumido no presente estudo. Os dados foram extraídos dos relatórios de monitorização da ETAR da Base Aérea N°5.

Durante este período, observa-se uma variação significativa dos caudais de água tratados. A variação mensal dos caudais, além de ser influenciada pela pluviosidade, depende das diversas atividades realizadas na Base Aérea N°5. Essas variações ocorrem devido à flutuação do número de indivíduos presentes na base e à realização de eventos em diferentes épocas do ano. As variações foram mais significativas nos anos de 2018 e 2021, verificando-se que os meses de fevereiro a maio apresentam os volumes de água tratada mais elevados. Nos períodos de 2019, 2020 e 2022 a variação do volume mensal de água tratada é menos significativa, com um máximo em janeiro de 2020 (3592 m³) e um mínimo em junho de 2019 (1730 m³).

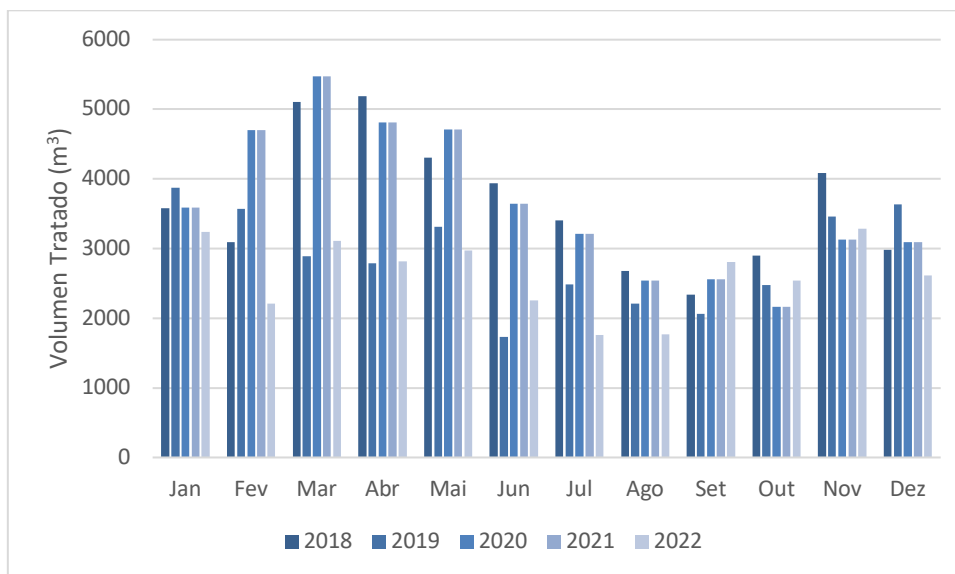


Figura 5. Volumes mensais tratados na ETAR da Base Aérea N.º 5 (2018 a 2022).

As figuras 6 e 7 mostram a variação de alguns parâmetros físico-químicos monitorizados na água residual, à entrada e à saída da ETAR, no período de referência 2018 – 2022. De acordo com o plano de controlo da ETAR, a monitorização da água residual à entrada decorre trimestralmente, e à saída da ETAR decorre mensalmente. Os parâmetros de qualidade analisados são, entre outros: pH, Carência bioquímica de oxigénio (CBO₅) e Azoto total (N_{Total}) na água residual à entrada da ETAR; e pH, CBO₅, Sólidos Suspensos Totais (SST), N_{Total} e Fósforo total (P_{Total}) na água tratada. Esses dados são essenciais para avaliar o desempenho da ETAR, ajudando a compreender a eficiência dos processos de tratamento, identificar possíveis problemas e garantir que os efluentes atendam aos padrões regulamentares estabelecidos.

Observa-se que os valores de pH na água a tratar não variaram de forma significativa ao longo do período de análise, valores entre 7,2 e 8,1, com exceção do valor apresentado em março de 2019 (5,9), que foi significativamente mais baixo (figura 6). Os valores apresentados são considerados adequados para o funcionamento eficiente do processo biológico de tratamento (Amaya & Cruz, 2016).

A CBO₅ varia significativamente ao longo do tempo, sugerindo a alimentação de concentrações variáveis de matéria orgânica à ETAR, o que pode afetar a estabilidade do tratamento biológico (Monte et al., 2016). No ano de 2019, a ETAR recebeu a concentração mais elevada de CBO₅: 240 mg O₂/L em junho e 391 mg O₂/L em setembro. Nestes meses,

o caudal afluente à ETAR foi mais baixo (período seco), o que poderá ter conduzido ao aumento observado na CBO_5 .

A análise do N_{Total} na AR à entrada da ETAR também indica flutuações ao longo do tempo, que não se conseguem correlacionar com o volume de água afluente à ETAR e com os outros parâmetros de qualidade da água.

As diferenças podem estar associadas às diversas atividades que decorrem na Base Aérea N°5, que não se conhecem em detalhe no período em análise.

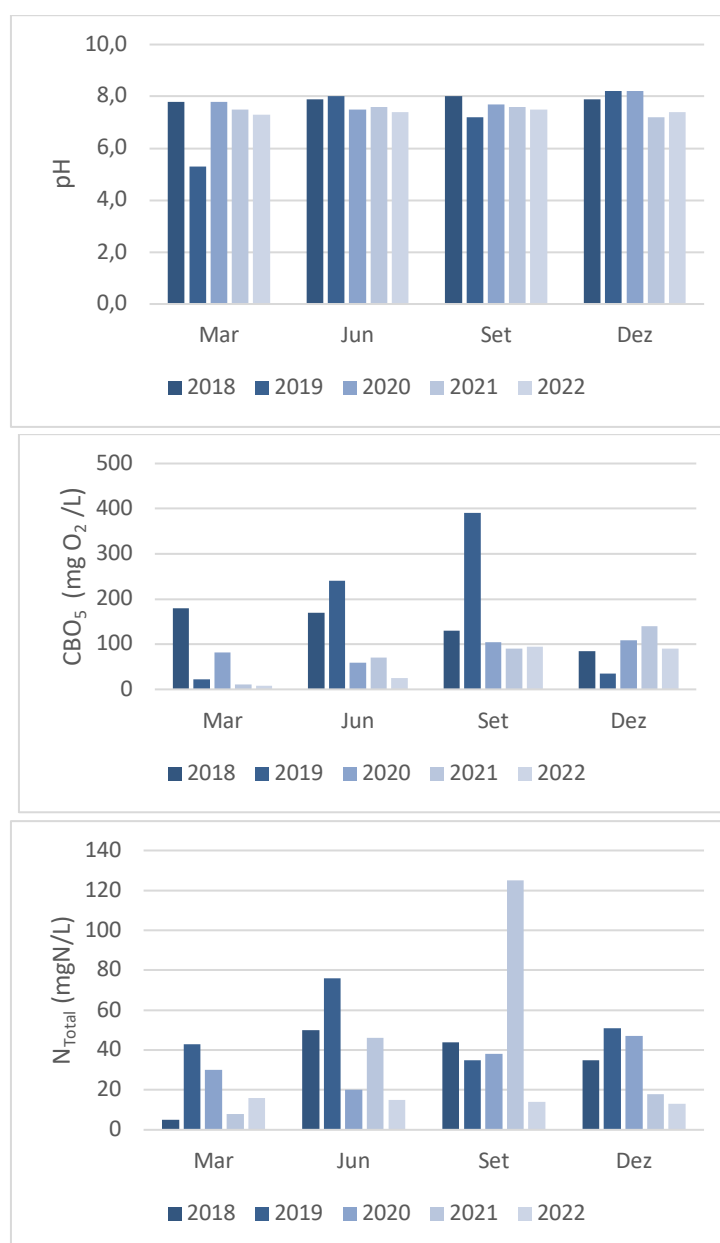


Figura 6. Valores trimestrais de pH, CBO_5 e N_{TOTAL} na água residual à entrada da ETAR da Base Aérea N.º 5 (2018-2022).

As características da água tratada na ETAR da Base Aérea Nº 5, entre 2018 e 2022, evidenciam variações significativas ao longo desse período (figura 7).

No caso do pH, os valores variam entre 6,0 e 7,4 no período de 2018 a 2022, o que revela uma diminuição do pH da AR durante o processo de tratamento, provavelmente devido ao elevado tempo de permanência da AR na ETAR.

Os valores de CBO₅ registam um valor máximo em junho de 2019 (50 mg O₂/L) e um pico elevado em agosto de 2018 (45 mg O₂/L); e valores mínimos registados em abril de 2022 e agosto de 2018 (5 mg O₂/L).

A concentração de SST varia ao longo do ano, sendo mais elevada nos meses de inverno (dezembro a fevereiro), com um pico de 90 mg/L em fevereiro, e mais baixa nos meses de verão (junho a agosto), alcançando um mínimo de 10 mg/L em agosto. Apesar das flutuações sazonais, a concentração de SST na água tratada manteve-se abaixo do limite máximo permitido durante todo o ano, indicando uma boa eficiência do processo de tratamento da ETAR.

O N_{Total} na água tratada registou um máximo em setembro de 2020 (60 mg N/L), e mínimos em abril de 2021 (13 mg N/L) e em maio de 2018 (14 mg N/L).

No caso dos valores de P_{Total} observa-se um mínimo em março de 2021 (2 mg P/L) e um máximo em setembro de 2018 (9,8 mg P/L). Em 2018, a variação mensal de P_{Total} é menos significativa, com um ligeiro aumento nos meses de verão. Em 2019, há picos pronunciados em março, julho, setembro e outubro. Em 2020, os valores são mais uniformes, com menores flutuações mensais. Em 2021, nota-se uma variação significativa, com um pico em agosto e aumentos nos meses de inverno. Em 2022, os valores são relativamente estáveis, com algumas flutuações menores ao longo do ano.

Embora as variações identificadas nos parâmetros analisados possam estar relacionadas com influências sazonais (estação húmida *versus* estação seca) e consequentes alterações de caudal e concentrações afluentes à ETAR, que afetam a eficiência da ETAR, os dados disponibilizados não permitem estabelecer uma relação direta entre eles.

A eficiência média anual da ETAR da Base Aérea Nº5 na remoção de CBO₅ ao longo de 2018 a 2022 foi de 83%, com valores que variaram entre um mínimo de 77% em 2022 e um máximo de 86% em 2019, indicando um desempenho relativamente estável. No entanto, a

remoção de N_{Total} mostrou-se extremamente variável, com eficiência geralmente baixa, inferior a 14%, exceto em 2021, quando atingiu 85%. De acordo com o referido por Rocha (2020), a ETAR da Base Aérea N°5 encontra-se sobredimensionada, face aos caudais e cargas atualmente tratados. A reduzida carga mássica, combinada com elevados tempos de retenção hidráulico e idade das lamas, leva à insuficiente assimilação de azoto e problemas de sedimentabilidade no decantador secundário, resultando numa perda de eficiência no tratamento da AR afluente (Perry, 2020). Assim, embora a remoção de CBO_5 tenha atingido valores satisfatórios no período em análise, a variabilidade na remoção de N_{Total} evidencia a necessidade de melhorias no processo de tratamento, que poderiam também ter reflexos positivos na redução da concentração de matéria orgânica na água tratada. O desempenho excepcional em 2021, com eficiências na remoção de CBO_5 e N_{Total} elevadas (84% e 85%, respetivamente), sugere que ajustes operacionais específicos poderão ter contribuído para a melhoria da eficiência, destacando a importância de continuar a implementar tais práticas para alcançar resultados consistentes. Portanto, a ETAR deve focar-se em estratégias para melhorar a assimilação de azoto e a sedimentabilidade das lamas, ajustando a carga mássica, tempo de retenção hidráulico e idade das lamas, para melhorar a qualidade do efluente tratado.

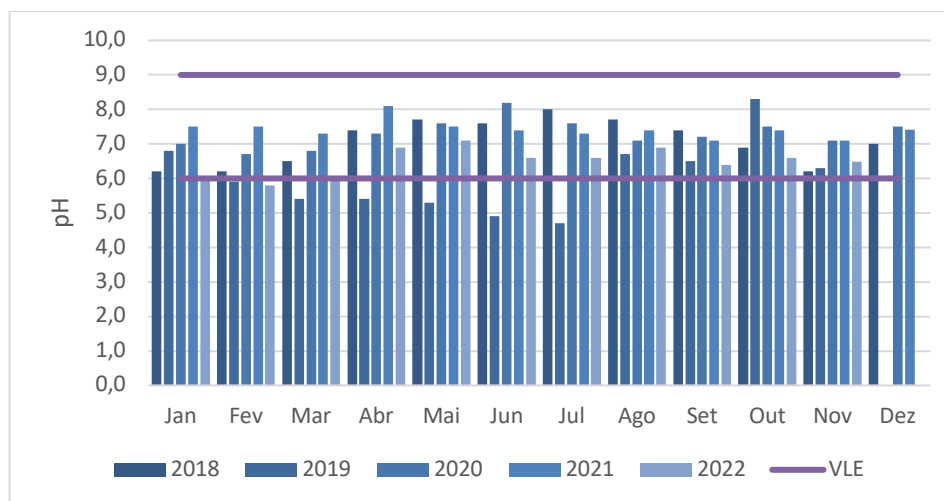


Figura 7. Valores Mensais de pH, SST, CBO_5 , N_{Total} , P_{Total} na água residual tratada da ETAR da Base Aérea N.º 5 (2018-2022) e Valores Limite de Emissão (VLE), de acordo com o Decreto de Lei nº 236/98.

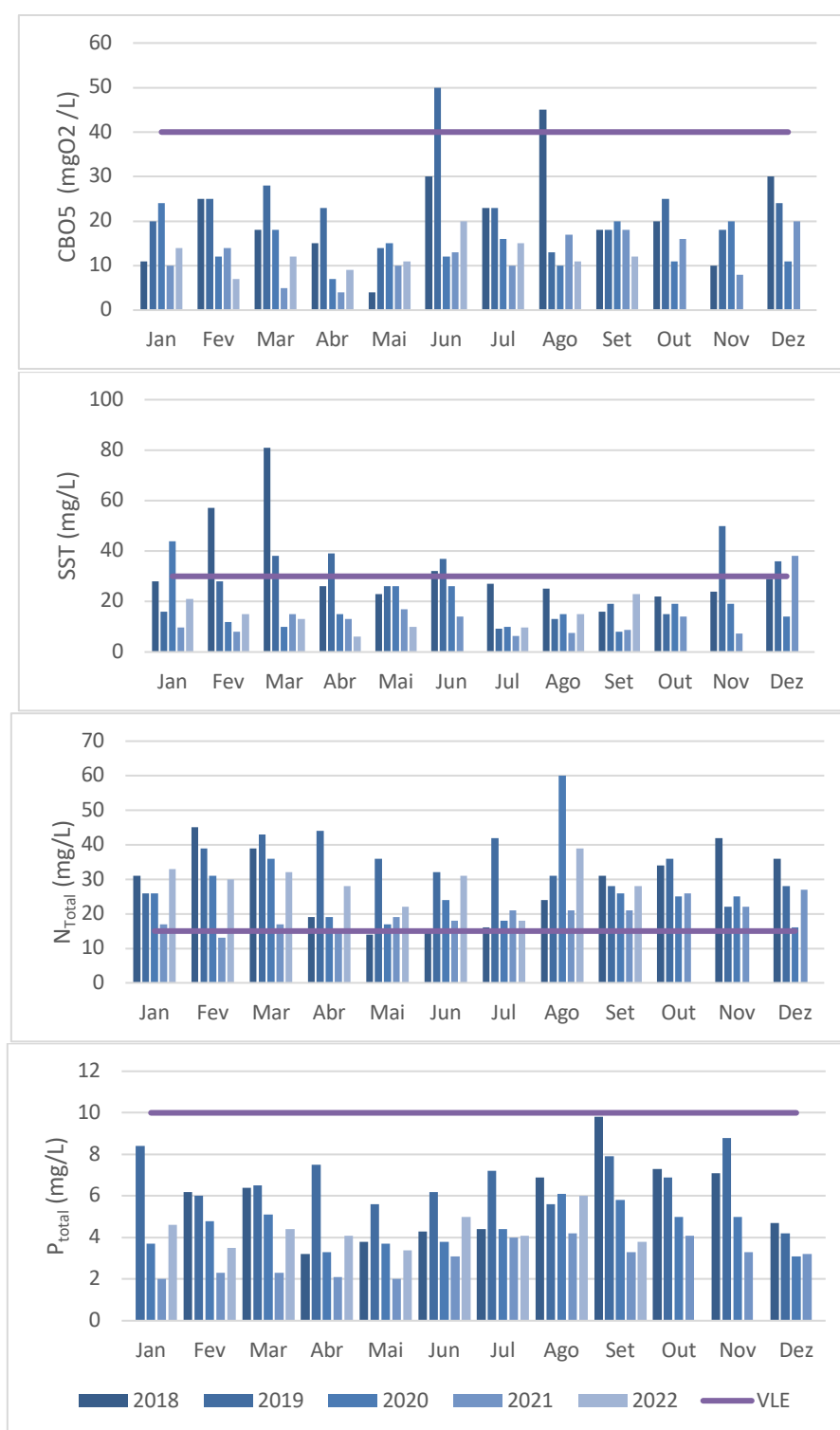


Figura 7 (cont.). Valores Mensais de pH, SST, CBO₅, N_{Total}, P_{Total} na água residual tratada da ETAR da Base Aérea N.º 5 (2018-2022) e Valores Limite de Emissão (VLE), de acordo com o Decreto de Lei n.º 236/98.

Ao analisar a conformidade dos parâmetros pH, CBO₅, SST, N_{Total} e P_{total} com os limites estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 236/98, observa-se que à exceção do N_{Total}, os parâmetros analisados estão, na generalidade, de acordo com os valores limite de emissão (VLE).

No período em análise, o pH do efluente tratado varia maioritariamente na gama definida (6,0 – 9,0), embora em alguns meses do ano de 2019 (fevereiro, março, abril, maio, junho e julho), se tenham registados valores inferiores ao mínimo. Os valores mensais de CBO₅ na água residual tratada estão abaixo do VLE (40 mg O₂/L), exceto nos meses de agosto 2018 e de junho de 2019, onde atingiram 45 mg O₂/L e 50 mg O₂/L, respetivamente; os valores de SST também se encontram abaixo do VLE (60 mg/L), exceto no mês de março de 2018, onde atingiu 81 mg/L; e os valores de P_{Total} são inferiores ao limite permitido (10 mg P/L).

A análise ao parâmetro N_{Total} na água tratada revela que este excede o limite permitido (15 mg N/L) em praticamente todas as amostras analisadas, sugerindo a necessidade de medidas corretivas na operação da ETAR, tal como reportado por Perry (2020), para garantir que os valores de N_{Total} se enquadrem nos limites estabelecidos. Ajustes no processo de tratamento biológico e/ou investimento em tecnologias de remoção de azoto na ETAR, tais como, a intensificação do processo de nitrificação-desnitrificação, com a utilização de um reator anóxico de lamas ativadas ou um sistema de biofiltração; e a inclusão processos de membrana (como a osmose inversa e nanofiltração), seriam possíveis soluções para este problema. Estas tecnologias podem aumentar a eficiência na remoção de compostos de azoto, assegurando que os efluentes tratados cumprem os padrões regulamentares e contribuem para a proteção do meio ambiente (Oliveira et al., 2021).

A avaliação da conformidade da água residual tratada, no que se refere à sua reutilização para rega, segundo os padrões de qualidade estabelecidos no Decreto-Lei nº 119/2019, de 21 de agosto, remete para uma classe de qualidade E em 2018 e 2019; e B, a partir de 2020, considerando os parâmetros CBO₅ e Sólidos Suspensos Totais (SST) (tabela 3). Relativamente aos parâmetros N_{Total} e P_{Total}, são várias as amostras que apresentam valores superiores aos valores de referência do Decreto-Lei nº 119/2019, tendo-se verificado a melhoria da qualidade da água a partir de 2021, no que se refere ao P_{Total}. No entanto, estes parâmetros não são de cumprimento obrigatório. Contudo, para uma classificação efetiva da água gerada na ETAR será necessário completar esta avaliação com a análise de parâmetros de cumprimento obrigatório, como por exemplo, a quantificação de *E. coli*.

Tabela 3. Normas de Qualidade da Água para Reutilização em Irrigação: Parâmetros CBO₅, SST, N_{Total} e P_{Total}

Parâmetro	2018 *		2019 *		2020 *		2021 *		2022 *		Classe
	Nº amostras conformes	% amostras conformes	Nº amostras conformes	% amostras conformes	Nº amostras conformes	% amostras conformes	Nº amostras conformes	% amostras conformes	Nº amostras conformes	% amostras conformes	
CBO ₅	1	8,3	0	0,0	2	16,7	4	33,3	2	16,7	A (≤ 10 mg O ₂ /L)
	9	75,0	10	83,3	12	100,0	12	100,0	9	100,0	B a D (≤ 25 mg O ₂ /L)
	11	91,6	11	91,7							E (≤ 40 mg O ₂ /L)
SST	0	0,0	1	8,3	3	25,0	6	50,0	4	33,3	A (≤ 10 mg/L)
	10	83,3	7	58,3	11	91,6	11	91,6	9	100,0	B a D (≤ 35 mg/L)
	12	100,0	12	100,0							E (≤ 60 mg/L)
N _{Total}	2	16,6	0	0,0	0	0,0	2	16,6	0	0,0	A a E (15 mg N/L)
P _{Total}	5	41,6	1	8,3	9	75,0	12	100,0	8	88,9	A a E (5 mg P/L)

* Nº total de amostras da série nos anos em análise: 12

Cumpra os critérios de conformidade definidos nas alíneas a) (nenhuma amostra excede o valor paramétrico definido em mais de 75%), e b) (nº máximo de amostras não conformes: 2, numa série de amostras entre 8 e 16) do artigo 18º do Decreto-Lei nº 119/2019, de 21 de agosto

3.2. Caracterização das lamas produzidas na ETAR da Base Aérea N°5 Monte Real

Os valores anuais de lama desidratada na ETAR da Base Aérea N°5 no período de 2018 a 2022, obtidos a partir dos relatórios do Departamento de Ambiente, encontram-se resumidos na tabela 4. Como se pode verificar, a desidratação das lamas ocorre de forma estratégica, alinhada com o processo operacional da ETAR. O procedimento é desencadeado quando o volume de lamas gerado atinge um valor significativo, geralmente após a acumulação no sedimentador. A decisão de desidratar as lamas é baseada na necessidade de assegurar uma gestão eficaz dos resíduos produzidos, garantindo assim o funcionamento ótimo da ETAR (Gonçalves, 2017).

Em 2018, ano em que o volume de lama gerado foi mais elevado, a desidratação das lamas ocorreu em quatro meses; enquanto em 2021 e 2022, nos quais o volume de lama gerado foi significativamente inferior, a desidratação ocorreu apenas em um mês. Não se tem informação relativamente aos meses em que decorreu a desidratação de lamas em 2019, mas atendendo ao que se verificou nos anos de 2018 e 2019 na fase líquida, pensa-se que a desidratação terá sido efetuada com a mesma periodicidade. Em períodos com volumes mais elevados de lama, a desidratação é agendada preferencialmente para os meses mais quentes, visando uma maior eficiência e rapidez no processo da ETAR (Gonçalves, 2017).

Tabela 4. Volume das lamas na ETAR da Base Aérea N°5 produzidas durante o período 2018-2022.

Ano	2018	2019	2020	2021	2022
Volume (m ³)	25	30	13,5	7	2
Meses de desidratação	mai, jun, ago, out	-	jan, jun, jul, nov	jul	mar

Para compreender melhor o funcionamento da ETAR da Base Aérea N°5 de Monte Real, é essencial analisar a relação entre o volume de lama desidratada gerada e o caudal de AR tratada e respetivas concentrações afluentes, na tentativa de correlacionar a quantidade de resíduos sólidos gerados no processo de tratamento e a eficiência da ETAR ao longo dos anos. Em 2018 e em 2019, o volume de lama desidratada foi mais elevado (25 m³ e 30 m³, respetivamente), tendo diminuído a partir de 2020 (valor máximo de 13,5 m³ em 2020 e mínimo de 2 m³ em 2022). De acordo com os volumes de anuais afluentes à ETAR (figura 3)

e as variações mensais no volume de AR tratada ao longo dos anos (figura 5), não é possível estabelecer uma relação entre o volume de AR tratada e o volume de lama. Apesar disso, identifica-se uma maior concentração de CBO₅ na AR afluente à ETAR em 2018 e 2019, compatível com a maior geração de lama no processo de tratamento nesses anos. A diminuição no volume de lama desidratada nos últimos anos pode estar relacionada com melhorias nos processos operacionais da ETAR.

A avaliação da qualidade das lamas produzidas na ETAR relativamente ao seu conteúdo em metais é essencial para encaminhamento para valorização agrícola. Os resultados da tabela 5 permitem a comparação entre os valores médios anuais observados na ETAR da Base Aérea N.º 5 no período 2018-2022 e os valores limite de concentração em lamas para aplicação no solo agrícola (Decreto-Lei nº 276/2009, de 2 de outubro). As análises das lamas da ETAR são realizadas, em média, duas vezes por ano. Segundo os dados disponibilizados, a concentração de metais nas lamas produzidas na ETAR, nomeadamente, cádmio, cobre, níquel, chumbo, zinco, mercúrio e crómio, estão abaixo dos valores limite permitidos, o que indica a conformidade com os padrões de qualidade definidos na legislação para aplicação das lamas em solo agrícola. Esta análise indica que as lamas geradas na ETAR da Base Aérea N.º 5 atendem aos critérios de segurança estabelecidos para utilização na agricultura, prevenindo a contaminação do solo, da água subterrânea e dos ecossistemas associados, e assegurando que os alimentos produzidos não representem perigo para os consumidores.

Tabela 5. Limites de concentração de metais em lamas para aplicação em solo agrícola e os valores médios anuais observados nas lamas da ETAR da Base Aérea N.º 5 no período 2018-2022.

Parâmetro	Valores limite (mg/kg matéria seca) *	2018	2019	2020	2021	2022
Cádmio	20	15	14	18	16	18
Cobre	1000	310	340	210	350	350
Níquel	300	31	23	33	43,5	32
Chumbo	750	45	42	42	45	43
Zinco	2500	970	920	458	855	1000
Mercúrio	16	0,04	nd **	0,29	0,30	0,23
Crómio	1000	85	63	46	87	89

*Valores limite de concentração em lamas destinadas à aplicação no solo agrícola - Quadro Nº2, Decreto-Lei nº 276/2009, de 2 de outubro.

** nd – não detetado.

Na tabela 6 são apresentados os limites admissíveis para os parâmetros microbiológicos *Escherichia coli* e *Salmonella spp.* nas lamas provenientes de ETAR para uso agrícola e os valores observados nas lamas da ETAR da Base Aérea N.º 5, nos anos de 2018 a 2022.

Como se pode verificar, quando o objetivo é a aplicação de lamas de ETAR em solo agrícola, o limite permitido para *E. coli* é < 1000 células/g de matéria fresca. A avaliação de *E. coli* nas lamas geradas em 2018 e 2019 indica que esse limite foi excedido (1800 células/g de matéria fresca), sendo que, a partir de 2020, o valor registado reduziu significativamente, atingindo um máximo de 160 células/g em 2022. No que se refere ao parâmetro *Salmonella spp.*, verificou-se uma ausência consistente desta espécie nas amostras analisadas, no período em análise (2018 a 2022). Assim, desde 2020, as lamas geradas na ETAR da Base Aérea N.º 5 mostraram conformidade, atendendo aos padrões de segurança microbiológica estabelecidos para a aplicação de lamas em solos agrícolas.

Tabela 6. *Escherichia coli* e de *Salmonella spp* em lamas para aplicação em solo agrícola e valores médios anuais observados nas lamas da ETAR da Base Aérea N.º 5 no período 2018-2022

Parâmetro	Valores limite *	2018	2019	2020	2021	2022
<i>Escherichia coli</i>	< 1000 células/g de matéria fresca	1800	1800	100	10	160
<i>Salmonella spp.</i>	Ausente em 50 g de material original	Neg./50 g	Neg./50 g	Neg./50 g	Neg./50 g	Neg./50 g

*Valores limite de microrganismos em lamas destinadas à agricultura - Quadro Nº5, Decreto-Lei nº 276/2009, de 2 de outubro.

Além dos parâmetros microbiológicos, o aproveitamento das lamas de ETAR na agricultura deve ser acompanhado pela análise de outros parâmetros, tais como pH, N_{Total}, Azoto Amoniacal, Nitratos, P_{Total}, Potássio, Magnésio e Cálcio, embora não estejam estabelecidos limites específicos para estes parâmetros, e ainda outros compostos orgânicos, cujos limites estão estabelecidos (Quadro Nº4 Decreto-Lei nº 276/2009, de 2 de outubro). Em relação ao pH, um valor de pH entre 6,5 e 7,5 é considerado adequado para a maioria das aplicações agrícolas (Marin & Rusănescu, 2023). Uma vez que no período em análise, o pH médio das lamas geradas na ETAR da Base Aérea N.º 5 variou entre 4,0 (em 2021) e 6,7 (em 2018), a sua aplicação poderá estar limitada para algumas culturas e deverá ser monitorizada para evitar acidificação do solo.

4. Materiais e métodos

O estudo do cultivo de plantas com água residual e com lamas decorreu em duas etapas, nomeadamente:

- Cultivo de uma espécie com potencial biofertilizante em sistema hidropónico (solução nutritiva e água residual) e em solo/lamas da ETAR;
- Cultivo de plantas (alfaces) em solo/lamas da ETAR, com e sem adição da espécie biofertilizante.

Os sistemas de cultivo foram instalados no Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados (LSMI) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. Este laboratório consiste numa estufa composta por uma estrutura metálica em arco, com cerca de 150 m², coberta por um filme de polietileno transparente, com aberturas laterais para arejamento nos dias de temperaturas mais elevadas.

Durante os ensaios procedeu-se à monitorização de parâmetros de qualidade da água e das lamas/solos, para avaliar a disponibilidade de nutrientes necessários às plantas e o efeito do crescimento na remoção de nutrientes; e de parâmetros de crescimento das espécies cultivadas, para avaliar o grau de adaptação aos sistemas e substratos usados e o potencial de crescimento das plantas.

4.1. Cultivo de uma espécie com potencial biofertilizante

4.1.1. Seleção e cultivo do biofertilizante

A escolha de plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) da família das *Leguminosae*, como biofertilizante, é fundamentada pela sua adaptabilidade a uma ampla gama de condições. Esta planta é capaz de prosperar em diversas temperaturas, tolerando até 27 °C, e pode ser cultivada tanto em solos tradicionais quanto em sistemas hidropónicos, com variações de pH entre 4,5 e 7,5. O tempo necessário para o crescimento do feijoeiro varia de acordo com a variedade plantada, as condições ambientais, o tipo de solo e os cuidados de manutenção adotados. Geralmente, o período que decorre desde a sementeira até à colheita varia de 2 a 4 meses. O feijoeiro pode ser cultivado ao longo do ano, embora em regiões com invernos rigorosos, a temporada de cultivo possa ser limitada aos meses mais quentes. A presença do

feijoeiro no solo é altamente benéfica, pois contribui para a melhoria do solo ao fornecer compostos de azoto às raízes de outras culturas, por fixação simbiótica (Santos et al., 2017).

Alguns estudos foram conduzidos com feijoeiros em sistemas hidropónicos, tendo sido observadas as diferentes concentrações de nutrientes necessárias para o seu desenvolvimento (Abahri, 2015) e feita a comparação com o cultivo tradicional em solo. Para além do estudo das técnicas de produção, foram desenvolvidos outros estudos que avaliaram a eficácia dos feijoeiros na remoção de azoto e fósforo, entre outros elementos, destacando a sua capacidade de descontaminar efetivamente a água em sistemas hidropónicos (Esteva et al., 2003). Assim, o estudo destas plantas como descontaminantes de águas residuais em sistemas hidropónicos, representam uma área de investigação promissora, tendo em conta o seu potencial para absorver nutrientes e contaminantes.

O estudo foi realizado em dois sistemas, nomeadamente, num sistema hidropónico simples, sem recirculação; e num sistema de crescimento em solo/lamas (figura 8).

A bancada de trabalho foi montada numa superfície de 185 cm de largura e 125 cm de comprimento, numa zona coberta por telas de sombreamento, por forma a amenizar a intensidade de radiação solar entre os vários pontos da bancada. Nessa área, foi posicionado um total de 9 caixas, das quais 5 são sistema hidropónico e 4 são sistema de cultivo em solo/lamas.

O sistema hidropónico é composto por caixas de 23 litros de volume, contendo quatro plantas por caixa. As plantas foram posicionadas em pequenos vasos contendo grânulos de argila expandida (Leca) para suporte mecânico da planta, e estes foram encaixados num material flutuante (placas *roofmate*), dimensionado para servir de tampa à caixa e impedir a entrada de luz. O arejamento no interior da caixa foi assegurado através da ligação a uma bomba de ar comprimido com seis entradas (HAILEA ACO-328), que alimentava pequenos difusores, posicionados no fundo de cada caixa.

O sistema de crescimento em solo/lamas consistiu em caixas de 45 cm de comprimento e 25 cm de largura, nas quais a (solo orgânico ou lamas). As plantas (4 exemplares/caixa) foram distribuídas, assegurando uma distância entre elas de 12 cm.

Uma vez que o feijoeiro é uma planta trepadora, os sistemas de cultivo foram dotados de uma estrutura simples para suporte da parte aérea das plantas: no sistema hidropónico uma corda e no sistema de crescimento em solo/lamas, uma estaca, que permitiu erguer a planta.



Figura 8. Sistema de cultivo de feijão em sistema hidropónico e em solo/lamas.

A Tabela 7 resume as condições de crescimento testadas. O crescimento hidropónico decorreu em água residual tratada recolhida na ETAR da Base Aérea N.º 5, localizada em Monte Real, e em solução nutritiva especialmente preparada para o crescimento dos feijoeiros, numa proporção de 1:100, em relação a uma solução já testada no laboratório para crescimento de outras espécies de plantas, servindo como controlo positivo para comparação com o cultivo em água residual (Fernandez, 2010) (tabela 8).

Tabela 7. Condições de crescimento do feijão em sistema hidropónico e em sistema de cultivo em solo/lama.

Tipo de Cultivo	Condições de Crescimento
Crescimento hidropónico	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento em solução nutritiva • 1 caixa com 4 plantas
	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento em água residual (ETAR da Base Aérea Nº5) • 2 caixas com 4 plantas cada
Crescimento em solo/lamas	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento em substrato orgânico • 2 caixas com 4 plantas cada
	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento em lamas (ETAR da Base Aérea Nº5) • 2 caixas com 4 plantas cada

Com o intuito de fomentar práticas sustentáveis na gestão da água, optou-se por preparar a solução nutritiva utilizando água da chuva, coletada nas instalações da estufa. Vale ressaltar que a água da chuva tende a apresentar uma leve acidez. As águas da chuva são reconhecidas pela sua relativa pureza em comparação com outras origens, tais como águas superficiais e subterrâneas (Esteve et al., 2003).

Tabela 8. Solução Nutritiva proposta por Steiner (Fernandez, 2010).

Composição	Fórmula Química	Concentração (g/L)
Nitrato de cálcio	$(Ca(NO_3)_2)NH_4.NO_3.10H_2O$	34,13
Sulfato de magnésio	$MgSO_4 \cdot 7 H_2O$	24,75
Nitrato de potássio	KNO_3	4,56
Dihidrogenofosfato de potássio	$K H_2PO_4$	6,80
Sulfato de potássio	K_2SO_4	22,57
Cloreto de ferro	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	0,5985
Molibdato de sódio	$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0,821
Sulfato de manganês	$MnSO_4 \cdot H_2O$	0,095
Ácido bórico em pó	H_3BO_3	0,1255
Sulfato de zinco	$ZnSO_4 \cdot 7 H_2O$	0,015

O crescimento em solo/lamas foi efetuado com lamas geradas na ETAR da Base Aérea N.º 5, recolhidas no local de armazenamento da ETAR, depois do tratamento da fase sólida; e com solo (Siro Horta), como controlo positivo, para comparação com o cultivo em lamas.

Os ensaios decorreram entre 2 maio e 20 de junho de 2023, num total de 9 semanas. Durante esse período, o nível de água nas caixas de hidroponia foi ajustado por meio de adição de água da chuva, para garantir que as raízes das plantas estivessem mergulhadas, tendo sido necessário adicionar 10 litros de água a cada caixa, 35 dias após o início do cultivo.

Do mesmo modo, foi necessário regar as plantas que cresceram em solo/lamas com água da chuva, para manter a humidade do substrato.

4.1.2. Controlo dos sistemas de cultivo

O plano de monitorização implementado para avaliar a qualidade da água e do solo/lamas usadas nos sistemas de cultivo é apresentado na tabela 9. Os parâmetros temperatura (T), pH e condutividade elétrica (CE) foram medidos com uma sonda multiparamétrica Hanna-

HI9829. Os parâmetros nitratos (N-NO₃), fósforo total (P_{Total}) e fosfatos (P-PO₄) foram determinados segundo os métodos especificados na tabela 10.

Tabela 9. Plano de monitorização de água e do solo/lamas usada nos sistemas de cultivo

Tipo de Cultivo	Parâmetros	Frequência
Crescimento hidropónico	T, pH, CE N-NO ₃ , P _{Total} , P-PO ₄	Semanal
Crescimento em solo/lamas	N-NO ₃ , P _{Total}	Semanal

Os parâmetros indicados na tabela 9 foram avaliados, considerando a sua relevância no crescimento das plantas (Fonseca & Sousa, 2021). Além disso, a monitorização do teor de fósforo e de azoto permite avaliar a eficiência de absorção destes nutrientes pelas plantas e, conseqüentemente, avaliar o efeito na qualidade da água e do solo/lamas. Para a determinação do teor de nitratos nas amostras de solo/lamas, foi implementado e testado um procedimento de extração. Para a extração de N-NO₃, pesaram-se 2,00 g da amostra e adicionaram-se 50 ml de (NH₄)₂SO₄ 1 mol/L, seguida de agitação a 150 rpm durante 30 minutos. Para a determinação do P_{Total} no solo/lamas, pesaram-se 0,30 g da amostra e realizou-se a digestão a quente com uma mistura de ácido sulfúrico-ácido nítrico (1:5, v/v) concentrado até à ebulição da água, reduzindo significativamente o volume da solução. Após digestão, e no caso de haver sólidos presentes, procedeu-se à filtração e ajuste do pH da amostra (pH neutro).

Tabela 10. Métodos analíticos utilizados para quantificação dos parâmetros de qualidade da água e dos solos/lamas

Parâmetro	Amostra	Método	Norma	Equipamento
N-NO ₃	Água	Filtração/ Método colorimétrico da brucina	EPA 352.1	Espectrofotômetro VARIAN- Cary 50 UV-vis
N-NO ₃	Solo/Lamas	Extração com sulfato de amônio/Método colorimétrico da brucina	EPA 352.1	Espectrofotômetro VARIAN- Cary 50 UV-vis
P _{Total}	Água	Digestão nitro-sulfúrica/Método colorimétrico do ácido ascórbico	SMEWW 4500-P-E	Espectrofotômetro VARIAN- Cary 50 UV-vis
P _{Total}	Solo/Lamas	Digestão nitro-sulfúrica/ Método colorimétrico do ácido ascórbico	SMEWW 4500-P-E	Espectrofotômetro VARIAN- Cary 50 UV-vis
P-PO ₄	Água	Filtração /Método colorimétrico do ácido ascórbico	SMEWW 4500-P-E	Espectrofotômetro VARIAN- Cary 50 UV-vis

De modo a avaliar a influência do tipo de sistema de cultivo e do substrato no crescimento da planta, a monitorização dos parâmetros da cultura foi efetuada como apresentado na tabela 11.

Tabela 11. Plano de monitorização das plantas de feijoeiro

Tipo de Cultivo	Parâmetros	Frequência
Crescimento hidropónico	Altura da planta, comprimento das raízes, nº de folhas, nº de flores e nº de vagens	Semanal
Crescimento em solo/lamas	Altura da planta, nº de folhas, nº de flores e nº de vagens	Semanal

4.1.3. Preparação do biofertilizante

Após 9 semanas procedeu-se à colheita das plantas. A parte aérea, as raízes e as vagens das plantas foram separadas, tendo-se avaliado a massa seca associada à parte aérea. As vagens secaram na planta durante as últimas semanas de crescimento, devido à temperatura elevada na estufa, pelo que foram rejeitadas. As raízes também foram rejeitadas, por se considerar que a sua composição seria significativamente diferente das outras partes da planta, garantindo deste modo uma maior uniformidade das características do biofertilizante.

A secagem decorreu numa estufa de marca HolisterE32 a uma temperatura de 70 °C, durante 4 dias.

Para obter o biofertilizante, a massa seca da parte aérea das plantas foi triturada com um triturador da marca OSTER2.

4.2. Cultivo de plantas (alface) em solo/lamas da ETAR, com e sem biofertilizante

4.2.1. Sistema de cultivo

A cultura selecionada para o estudo foi a alface (*Lactuca sativa L.*) da família Asterácea, mais precisamente a variedade de alface frisada de folhas verdes.

Trata-se de uma planta herbácea, de ciclo anual, com raiz apumada e pouco desenvolvida, apresentando-se mais ou menos ramificada em função do modo de produção e das características do solo (Torres et al., 2015). A escolha dessa cultura foi influenciada pela forte produção de alface em Portugal ao longo de todo o ano, tanto ao ar livre quanto em estufas, comumente de novembro a abril. As folhas da alface são amplamente reconhecidas pelas suas qualidades dietéticas, ricas em vitaminas e fibras, e pela facilidade de preparo, sendo consumidas praticamente em todo o mundo em saladas cruas e como acompanhamento de diversos pratos. Além disso, a alface é conhecida por seu crescimento rápido. Em condições ideais, pode alcançar a maturidade em apenas 30 a 60 dias após o plantio. Permitindo a fácil monitorização do seu ciclo de desenvolvimento.

O sistema de cultivo foi construído com recurso a garrações de água de 6 L, cortados ao meio, que serviram de vasos para a cultura de alface (figura 9).



Figura 9. Sistemas de cultivo de alface em substrato orgânico, lamas da ETAR e lamas da ETAR com biofertilizante

A Tabela 12 resume as condições de crescimento testadas. Os ensaios de crescimento foram realizados em lamas geradas na ETAR da Base Aérea N.º 5, na presença de 0%, 5% e 10% de biofertilizante; e em solo (substrato orgânico Siro Horta), usado como controlo positivo, para comparação com o cultivo em lamas com e sem biofertilizante. A massa de substrato usada em cada vaso foi de 1,5 kg.

Os vasos foram colocados sobre a bancada de 185 cm x 125 cm, onde foi conduzido o estudo de crescimento do feijão. Os ensaios decorreram entre 16 de outubro e 16 de novembro de 2023. Ao longo do período de crescimento, as plantas foram regadas com água da chuva. Não foi necessário utilizar sombreamento durante o período de cultivo.

Tabela 12. Condições de crescimento da alface em sistema de cultivo em solo/lama, com e sem biofertilizante

Tipo de Cultivo	Condições de Crescimento
Crescimento em solo/lamas	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento em substrato orgânico • 2 caixas com 2 plantas cada
	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento em lamas (0% Biofertilizante) (ETAR da Base Aérea N°5) • 2 caixas com 2 plantas cada
	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento em lamas (5% Biofertilizante) (ETAR da Base Aérea N°5) • 2 caixas com 2 plantas cada
	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento em lamas (10% Biofertilizante) (ETAR da Base Aérea N°5) • 2 caixas com 2 plantas cada

4.2.2. Controle do sistema de cultivo

Para avaliar as características dos substratos, foram realizadas análises para determinar o teor de nitratos ($N-NO_3$), azoto amoniacal ($N-NTK$), fósforo total (P_{Total}), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), conduzidas semanalmente, permitindo a identificação de mudanças nas concentrações de cada um desses elementos ao longo do tempo.

Esses parâmetros foram selecionados por serem nutrientes fundamentais para as plantas. Além disso, é crucial identificar se o biofertilizante (plantas de feijoeiro) apresenta uma influência significativa na produção vegetal quando se usam lamas de ETAR.

Os métodos utilizados para realizar as determinações estão detalhados na tabela 13, a qual contém informações sobre os procedimentos utilizados para analisar cada parâmetro específico.

Durante o período de crescimento da alface, também foi realizada a avaliação da humidade dos substratos, utilizando o método de gravimetria, com uma frequência semanal. Este método consiste na pesagem dos substratos antes e após a secagem em estufa, permitindo a determinação precisa do teor de humidade ao longo do tempo.

Tabela 13. Métodos analíticos utilizados para quantificação dos parâmetros de qualidade dos substratos

Parâmetro	Método	Norma	Equipamento
N-NO₃	Extração com sulfato de amônio/Método colorimétrico da brucina	EPA 352.1	Espectrofotômetro VARIAN- Cary 50 UV-vis
N-NTK	Método de Kjeldahl - Titrimetria	ISO 5663-1994	Semi Automatic Distillation Unit UDK139 (VELP CIENTIFICA)
P_{Total}	Digestão nitro-sulfúrica/Método colorimétrico do ácido ascórbico	SMEWW 4500-P-E	Espectrofotômetro VARIAN- Cary 50 UV-vis
Cálcio (Ca)	Extração com cloreto de potássio /Método por espectrometria de absorção atômica com chama	SMEWW 3111B	Espectrofotômetro de absorção atômica VARIAN-spectrAA 55B
Magnésio (Mg)	Extração com cloreto de potássio/ Método por espectrometria de absorção atômica com chama	SMEWW 3111B	Espectrofotômetro de absorção atômica VARIAN-spectrAA 55B
Potássio (K)	Extração com acetato de amônio /Método por espectrometria de absorção atômica com chama	SMEWW 3111B	Espectrofotômetro de absorção atômica VARIAN-spectrAA 55B

Para a determinação de metais (K, Mg e Ca), as amostras foram inicialmente sujeitas a uma digestão nitro/sulfúrica (procedimento idêntico ao descrito para P_{Total}). No entanto, este método exige um tempo prolongado para a completa digestão das amostras, tendo-se optado pelo procedimento de extração, recorrendo à adição de cloreto de potássio 1 mol/L para extrair Mg e Ca, e à adição de acetato de amônio 1 mol/L para extrair K, durante 30 minutos sob agitação (150 rpm)

A monitorização dos parâmetros de crescimento da alface foi efetuada semanalmente, através de medições da altura da planta (parte aérea) e do número de folhas. Após seis semanas, procedeu-se à colheita das plantas. A parte aérea foi separada das raízes, tendo-se avaliado a massa seca associada à parte aérea, em cada planta.

5. Resultados e Discussão

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas duas fases do estudo efetuado, nomeadamente, cultivo de uma espécie com potencial biofertilizante (Secção 5.1.) e cultivo de uma espécie alimentar em solo/lamas da ETAR, complementado com o biofertilizante (Secção 5.2.).

5.1. Cultivo de uma espécie com potencial biofertilizante

A espécie com poder biofertilizante selecionada para cultivo foi o feijoeiro, sendo que o crescimento da espécie foi promovido em sistema hidropónico (solução nutritiva e água residual da ETAR da Base Aérea N.º 5) e em solo/lamas de ETAR.

5.1.1. Crescimento das plantas de feijoeiro em sistema hidropónico

A monitorização das características da água contida no interior das caixas do sistema hidropónico permitiu verificar as alterações decorridas na solução nutritiva (SN) e na água residual (AR) durante o crescimento do feijão, e analisar o efeito dessas mudanças no estado da cultura.

A figura 10 mostra a variação da T, pH e CE durante o crescimento. Como se pode verificar, a temperatura variou entre 20,2 °C e 21,6 °C, até aos 28 dias de crescimento, tendo aumentado a partir daí, devido ao aumento da temperatura exterior, já que se verificaram dias particularmente quentes nesse período.

O pH variou de forma semelhante na SN e na AR, exceto no dia 35. Esta alteração poderá ser justificada pela adição de água da chuva nas caixas (SN e água residual), de modo a repor o volume a 23 L. Durante o ensaio, o pH esteve compreendido na gama 6,5 a 7,5, que se considera adequada ao crescimento desta espécie (Santos et al., 2017).

A CE da água residual indica uma concentração mais elevada de sais e outros elementos dissolvidos (valor médio de 305,18 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na AR) que a da solução nutritiva (solução diluída em nutrientes, com valor médio de 41,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (figura 10). Tipicamente, os valores de condutividade elétrica na solução nutritiva para o crescimento de feijoeiros variam entre 1500 e 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Basso et al., 2012). No entanto, é relevante salientar que diferentes variedades de feijoeiros podem apresentar variações nas suas necessidades de nutrientes (Rivera et al., 2016). O valor médio de 41,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na solução nutritiva (SN) está bastante

abaixo do valor típico para o cultivo de feijoeiros em sistemas hidropônicos, mas pretendeu-se evitar a existência de excesso de nutrientes, garantindo a absorção completa por parte das plantas. Apesar do valor de CE na AR ser superior, também está abaixo do valor mínimo recomendado (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). No caso da SN, a CE manteve-se constante ao longo do período de crescimento das plantas; e no caso da AR, verificou-se que a CE diminuiu nos primeiros 14 dias, atingindo um valor de 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e manteve-se próximo deste registo até ao final do crescimento.

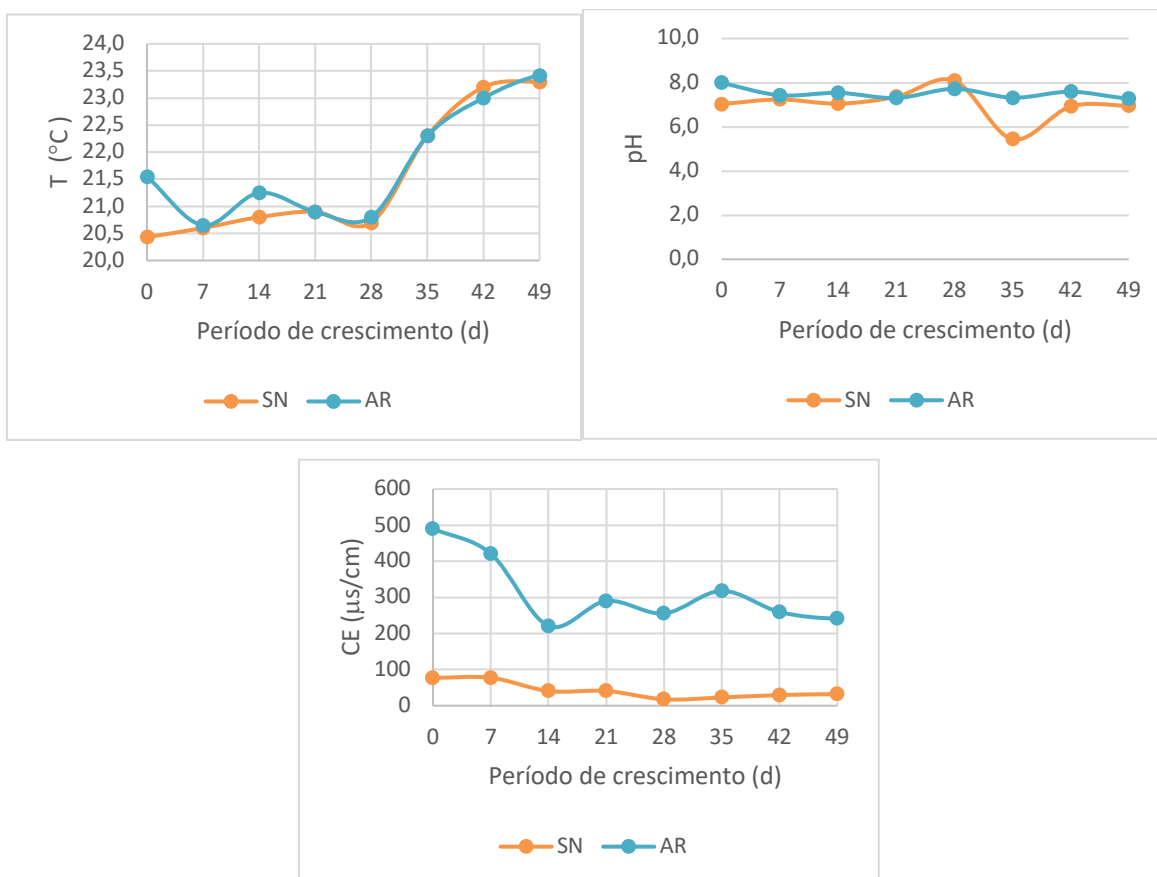


Figura 10. Variação dos valores de T, pH e CE durante o crescimento do feijoeiro em solução nutritiva (SN) e água residual (AR).

De acordo com as determinações de P_{Total} e de $P\text{-PO}_4$ (dados não apresentados), o teor total de fósforo presente nas amostras encontra-se maioritariamente na forma de fosfatos.

Durante o período de crescimento das plantas nos substratos hidropônicos, foi observada uma diminuição do teor de N-NO_3 e P_{Total} , tanto na solução nutritiva (SN) como na água residual (AR) (figura 11).

Este fenômeno ocorre devido ao processo de absorção de azoto e fósforo pela planta, a partir da água residual/solução nutritiva. Após aproximadamente 4 semanas, observou-se uma diminuição na concentração de nutrientes na água residual, o que evidencia a eficácia deste processo de remoção de nutrientes da água. Na solução nutritiva, a remoção de nutrientes prolongou-se até mais tarde (cerca de 35 dias), possivelmente porque a composição de nutrientes na solução nutritiva não estava equilibrada para atender às necessidades de crescimento dos feijoeiros, traduzindo-se numa menor capacidade de absorção pelas plantas, resultante de uma relação N:P menos favorável (Fernandez & Eichert, 2009). No entanto, a variação do teor de azoto e fósforo no sistema hidropônico não foi uniforme ao longo do período de crescimento. Essas variações, considerando as baixas concentrações de azoto e fósforo nas amostras recolhidas nos sistemas hidropônicos, podem ter sido influenciadas pelo volume de amostra usado (entre 5 mL e 20 mL) e, conseqüentemente, pelas incertezas associadas às respectivas determinações. Outro fator a ter em conta é o ajuste do volume das caixas com água da chuva, com volumes mais significativos no dia 35, o que exigiu ensaios laboratoriais adicionais até à 7ª semana (56 dias de crescimento), tendo sido observado um pico de azoto (mais acentuado) e fósforo após a adição de água, difícil de explicar, atendendo aos valores baixos nos dias 42, 49 e 56, não se descartando a possibilidade de ter havido também contaminação da amostra.

No final do período de crescimento identifica-se uma eficiência de remoção de nutrientes da AR de 92,1% e 98% no que se refere aos parâmetros N-NO₃ e P_{Total}, respetivamente. A capacidade de fixação de azoto e fósforo pelas plantas presentes nos substratos hidropônicos melhora o seu desenvolvimento e torna a planta um bom biofertilizante, aumentando o potencial de libertação de nutrientes durante a decomposição dos resíduos dos feijoeiros no solo, disponíveis para culturas em desenvolvimento (Galbiatti et al., 2011).

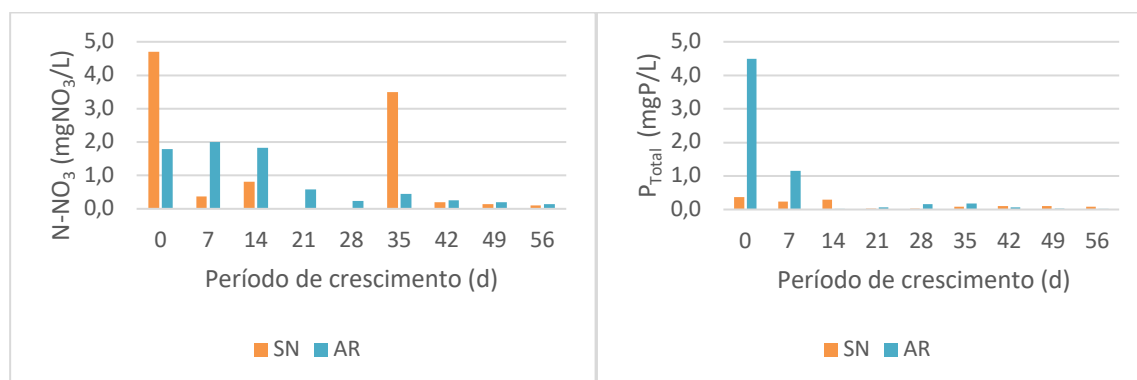


Figura 11. Variação da concentração de azoto e fósforo durante o crescimento do feijoeiro em solução nutritiva (SN) e água residual (AR).

Na figura 12 estão representados os resultados dos parâmetros de crescimento das plantas no sistema hidropónico. As plantas que cresceram em AR tiveram um desenvolvimento mais rápido do que as que cresceram em SN, verificando-se que a altura das plantas, o comprimento das raízes e o n.º de folhas foram sempre superiores (valores máximos de 150,5 cm *versus* 85,8 cm; 73,5 cm *versus* 53,8 cm; 26 *versus* 18, respetivamente), o que está de acordo com a composição das soluções hidropónicas testadas, ou seja, com a maior disponibilidade de nutrientes na água residual.

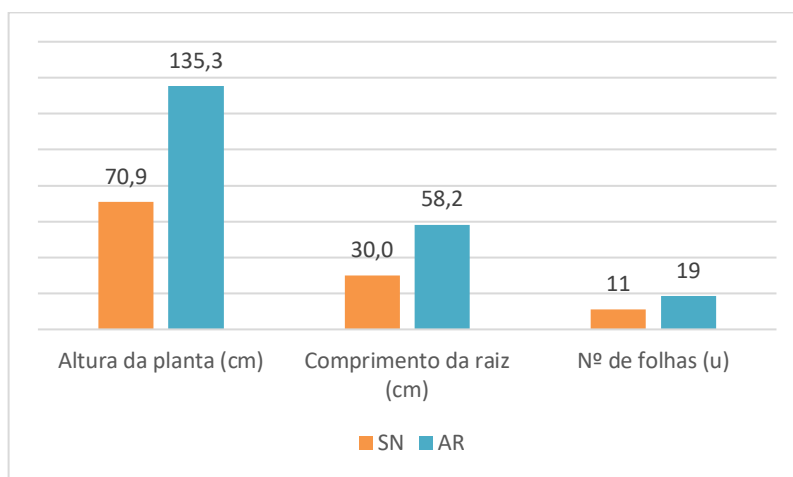


Figura 12. Variação da altura das plantas, comprimento da raiz e n.º de folhas (valor médio) do feijoeiro em crescimento hidropónico em solução nutritiva (SN) e água residual (AR).

No final do período de crescimento, a partir do 42º dia de crescimento, identificou-se um decréscimo no número de folhas das plantas do sistema hidropónico com água residual, que se considera estar relacionado com a baixa concentração de nutrientes na AR. A temperatura exterior elevada e a elevada exposição solar nesse período também pode ter justificado a perda de folhagem. Estas condições afetaram menos as plantas que cresceram em SN, provavelmente por se encontrarem num menor nível de desenvolvimento (figura 13).

O n.º de flores e o n.º de vagens que cresceram nas plantas de feijoeiro não foi significativo em nenhum dos sistemas hidropónicos, não permitindo uma comparação relevante entre eles (dados não apresentados). A temperatura elevada no final do período de crescimento promoveu a secagem das vagens e das flores nas plantas, pelo que essa fração foi rejeitada, não sendo avaliada (massa seca), nem usada na produção do biofertilizante.

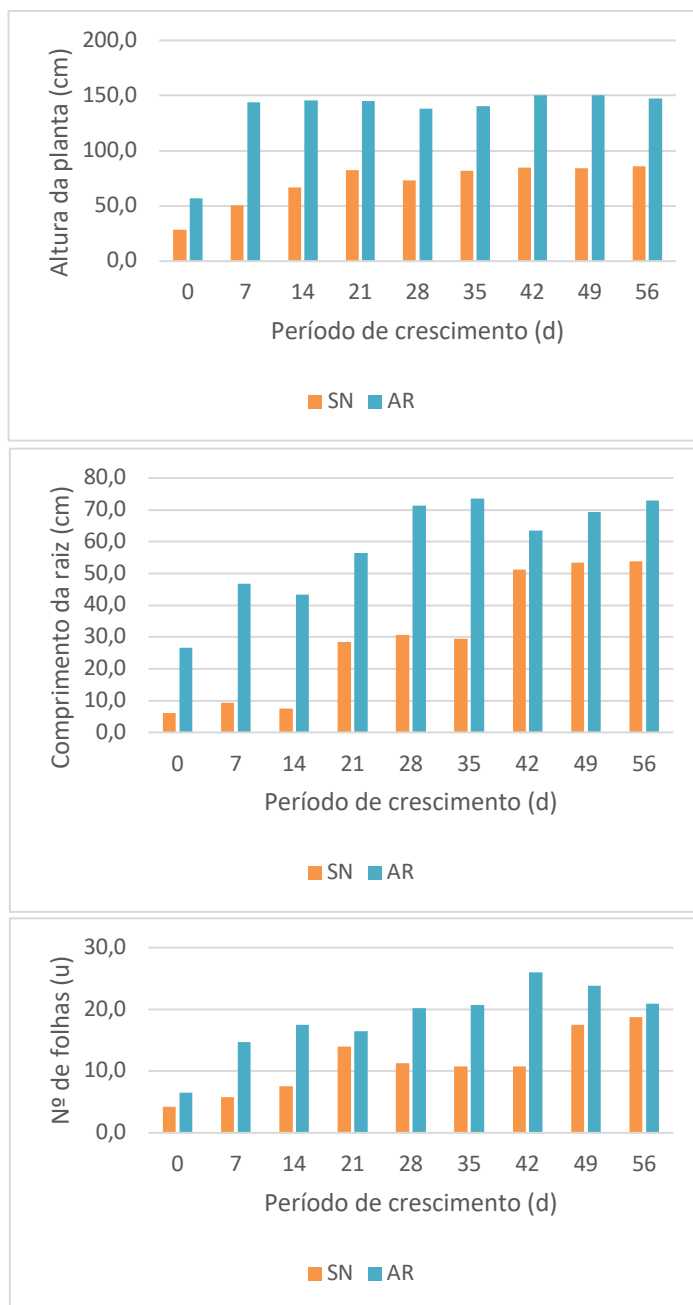


Figura 13. Variação da altura média das plantas, do comprimento da raiz e do nº de folhas durante o crescimento hidropônico do feijoeiro em solução nutritiva (SN) e água residual (AR).

5.1.2. Crescimento das plantas de feijoeiro em solo e lamas da ETAR

A figura 14 representa os resultados da variação da concentração de azoto e fósforo durante o crescimento das plantas em solo orgânico e em lama proveniente da ETAR da Base Aérea N°5. Observa-se que as lamas da ETAR apresentam uma concentração inicial de N-NO₃ de 1,7 mg NO₃/L e de P_{Total} de 1,5 mg P/L, bastante superior à do substrato orgânico (0,6 mg NO₃/L e 3 mg P/L), respetivamente.

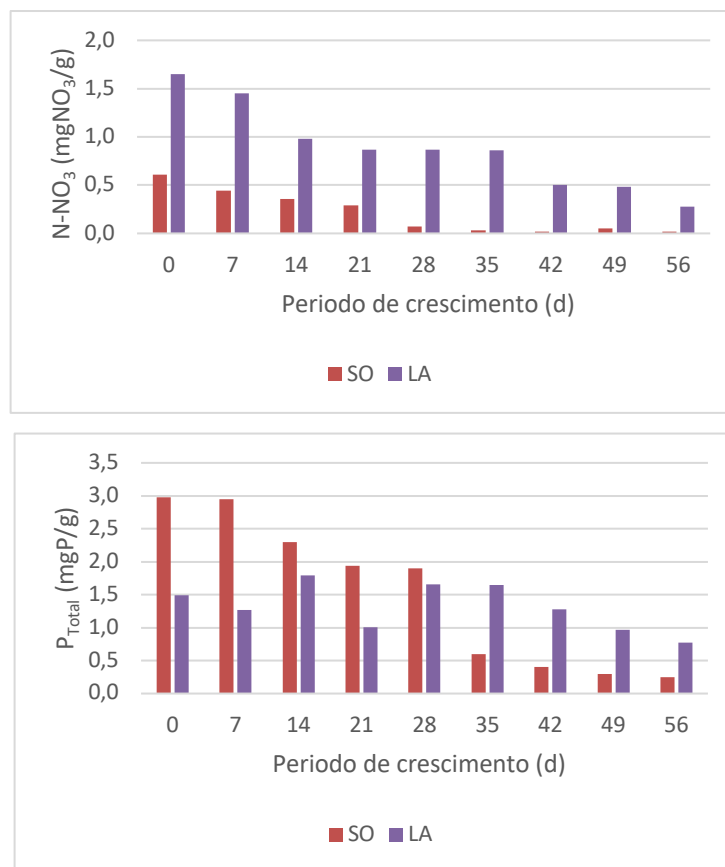


Figura 14. Variação da concentração de azoto e fósforo durante o crescimento do feijoeiro em solo orgânico (SO) e em lamas da ETAR (LA)

Os resultados indicam que, durante o desenvolvimento das plantas, houve uma diminuição gradual nas concentrações destes nutrientes em ambos os sistemas. Ao fim de 56 dias de crescimento, as eficiências de remoção de N-NO₃ e de P_{Total} foi de 96% e 90% no solo orgânico, e de 83% e 44% nas lamas de ETAR, respetivamente. Estes valores evidenciam a absorção dos nutrientes presentes nos substratos pelas plantas ao longo do seu ciclo de crescimento.

Na figura 15 são apresentados os parâmetros de crescimento do feijoeiro quando plantado em solo orgânico e em lamas provenientes da ETAR. Observa-se que o desenvolvimento é semelhante nos dois ensaios, indicando uma adaptação satisfatória das plantas ao sistema e aos substratos utilizados. No entanto, no final do período de crescimento, foi observada uma perda acentuada de folhas, principalmente nas plantas cultivadas no solo orgânico. Este facto pode estar relacionado com as altas temperaturas registadas na estufa, que aumentaram a evaporação de água nos substratos e agravaram significativamente o fenómeno de evapotranspiração. Esse efeito foi menos pronunciado nas plantas cultivadas nas lamas da

ETAR, pois esses substratos demonstraram uma maior capacidade de retenção de água, mantendo assim a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas.

Devido a uma relação desfavorável de N:P observada no solo orgânico feijoeiro ocorreu o amarelecimento das folhas, uma redução na produção de biomassa e uma perda de folhas devido ao aumento da temperatura. É importante destacar que os valores recomendados para a relação N:P no cultivo de feijão é de 3:1. Essa proporção equilibrada de azoto e fósforo é essencial para garantir um crescimento saudável e vigoroso das plantas, promovendo o desenvolvimento adequado das folhas, caules, flores e frutos. Portanto, ao ajustar a relação N:P para atender a essas recomendações, é possível melhorar a produtividade e a qualidade das plantas de feijão cultivadas em substrato (Fageria et al., 1996).

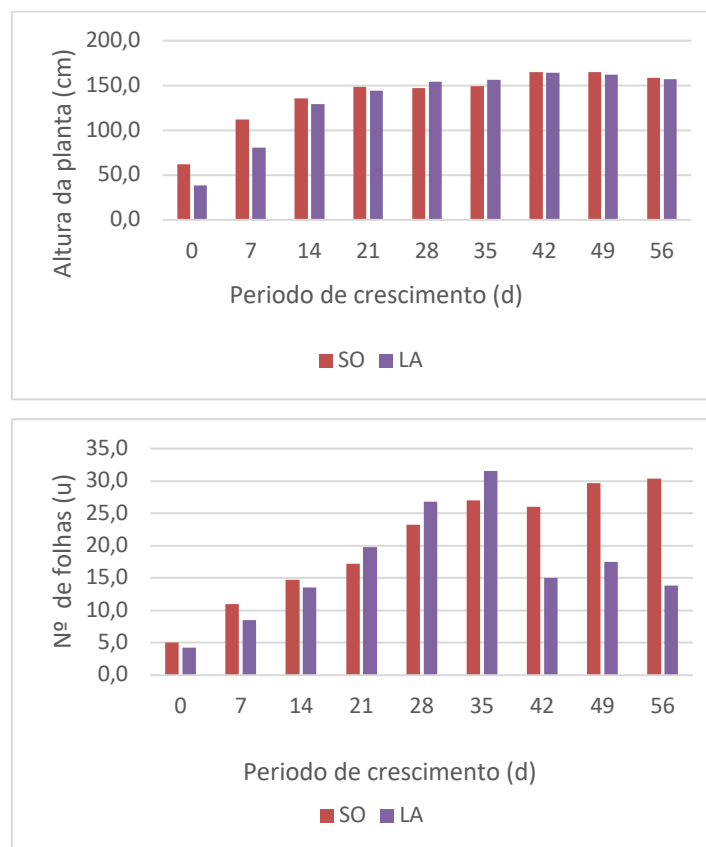


Figura 15. Variação da altura média das plantas e do nº de folhas durante o crescimento do feijoeiro em solo orgânico (SO) e em lamas da ETAR (LA).

O nº de flores e o nº de vagens que cresceram nas plantas de feijoeiro não foi significativo em nenhum dos sistemas (crescimento em solo orgânico e em lamas), não permitindo uma comparação relevante entre eles (dados não apresentados). A temperatura elevada no final do período de crescimento promoveu a secagem das vagens e das flores nas plantas, pelo

que essa fração foi rejeitada, não sendo avaliada (massa seca), nem usada na produção do biofertilizante.

5.1.3. Crescimento do feijão em sistema hidropônico *versus* substrato sólido

Na figura 16 é possível comparar o crescimento das plantas nos sistemas hidropônicos e de substrato sólido. Em relação à altura das plantas, observa-se que as espécies que cresceram na água residual, no solo orgânico e nas lamas de ETAR atingiram um valor final semelhante, enquanto que o desenvolvimento das plantas na solução nutritiva foi menor, devido à menor disponibilidade de nutrientes. Relativamente ao número total médio de folhas, verifica-se que o número mais elevado foi atingido nas plantas que cresceram na AR e nas lamas, onde a disponibilidade de nutrientes é mais elevada, denotando-se um efeito mais significativo da presença de azoto e fósforo no número de folhas do que na altura da planta. Além disso, as lamas apresentaram uma maior capacidade de retenção de água no período de maior temperatura (relativamente ao solo orgânico), o que deverá ter contribuído para um maior crescimento das plantas.

Na comparação da altura das plantas entre os diferentes sistemas de cultivo, podemos observar variações significativas ao longo do período de crescimento. No sistema hidropônico com AR, a altura da planta apresentou um aumento de 94 cm e na SN, de apenas 56 cm.

Já nos sistemas de substrato sólido, os resultados foram diferentes. No solo orgânico, a altura da planta apresentou um aumento de 159 cm e no sistema de lamas do ETAR, de 96 cm.

Os resultados indicam um crescimento equivalente para o uso de água residual e de lamas da ETAR, sendo o maior crescimento observado no solo orgânico, como seria de esperar, devido à sua composição em nutrientes (Figura 16).

Observa-se um crescimento mais rápido nas primeiras três semanas, devido à liberação mais fluente de nutrientes em hidroponia. Já nas lamas (LA) e no solo orgânico (SO), o crescimento é mais lento nas primeiras três semanas, mas posteriormente, por volta da semana 35, há um aumento robusto no número de folhas, devido ao alto teor de nutrientes. No caso do solo orgânico, há uma perda de folhas devido ao aumento do calor, enquanto nas lamas, a retenção de humidade contribui para um desenvolvimento mais estável.

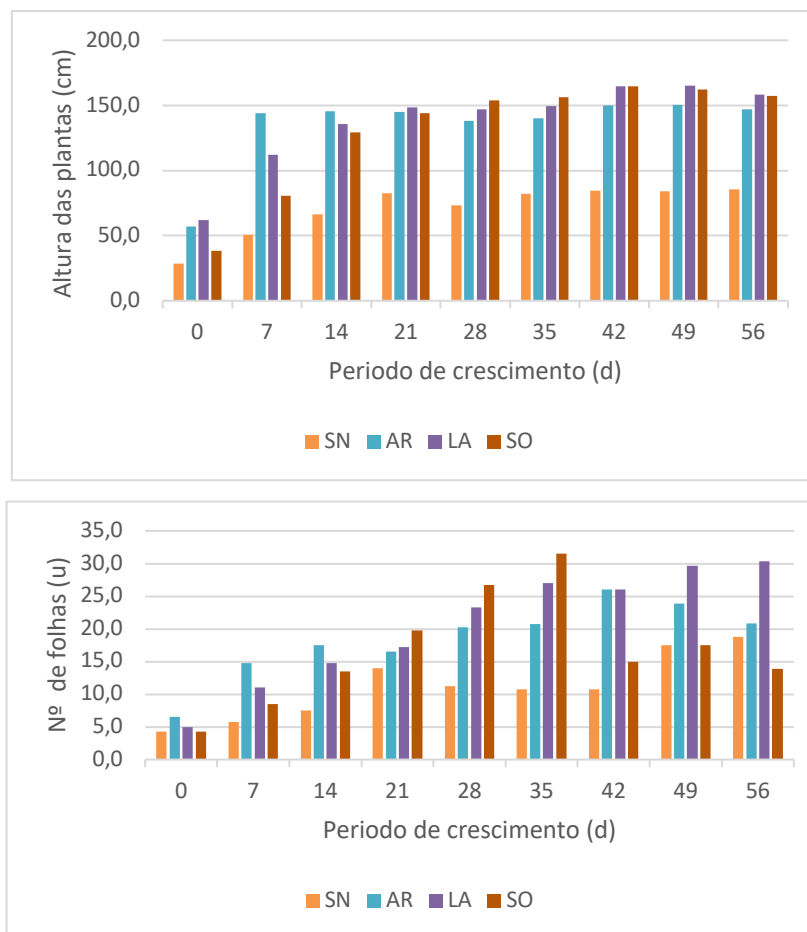


Figura 16. Comparação do Nº de folhas e Altura das plantas cultivadas em sistemas hidropónico (SN: Solução nutritiva; AR: água residual) e com substrato sólido (LA: Lamas da ETAR; SO: Solo orgânico).

O teor de humidade desempenha um papel crucial na criação de biofertilizantes a partir das plantas de feijoeiro, pois influencia diretamente a estabilidade e a qualidade do produto final. Um teor de humidade excessivamente alto pode propiciar o crescimento de microrganismos indesejados, levando à fermentação e decomposição do biofertilizante. Por outro lado, um teor de humidade muito baixo pode resultar em ressecamento e perda de eficácia (Nóbrega et al., 2001).

Assim, é essencial alcançar um equilíbrio adequado no teor de humidade para garantir a aplicação uniforme do biofertilizante e a absorção eficaz dos nutrientes pelas plantas. Isso maximiza os benefícios do biofertilizante para o crescimento e desenvolvimento das culturas, promovendo uma produção agrícola mais saudável e sustentável.

No caso específico da planta do feijoeiro, foi necessário separar as vagens e as raízes das plantas, utilizando apenas a parte aérea como biofertilizante. A massa seca total da parte

aérea das plantas produzidas por hidroponia foi de 30 g, e no substrato sólido, foi de 40 g. Os valores do teor de humidade obtidos para cada amostra foram de 73% e 78%, respetivamente (figura 17). Esses valores estão dentro da gama geralmente considerada apropriada para a produção de biofertilizantes a partir desta planta, proporcionando um substrato húmido ideal para a produção e aplicação eficaz do produto final.

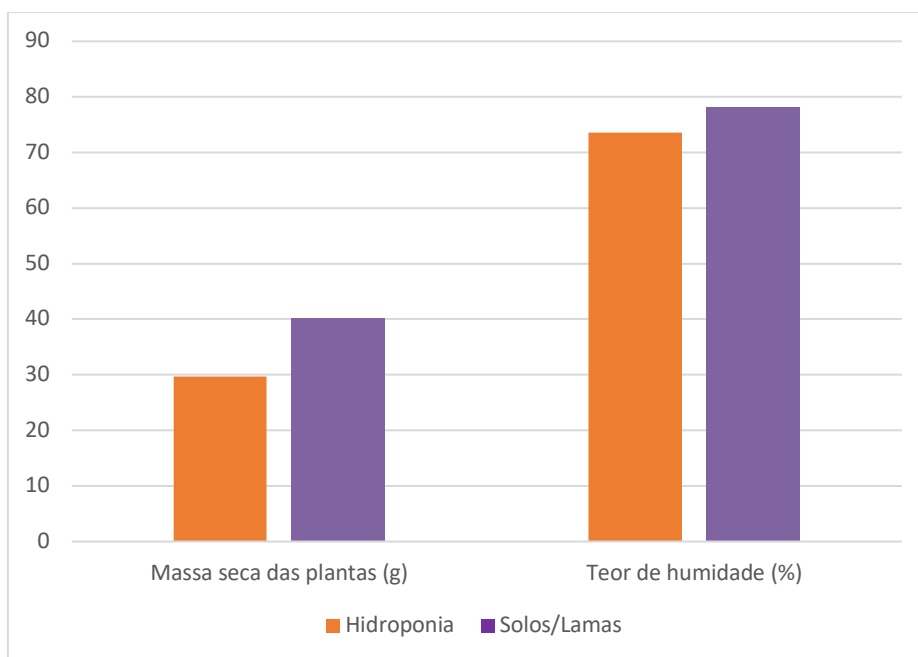


Figura 17. Resultados da avaliação da massa seca e do teor de humidade das plantas de feijoeiro (parte aérea)

5.2. Cultivo de plantas em solo e lamas da ETAR, com e sem adição de biofertilizante

O cultivo da alface (*Lactuca sativa L.*) decorreu em solo orgânico (Solo), lamas da ETAR sem adição de Biofertilizante (Lamas+0%Bio), Lamas de ETAR com a adição de 5% de Biofertilizante (Lamas+5%Bio) e Lamas de ETAR com a adição de 10% de Biofertilizante (Lamas+10%Bio). O período de crescimento foi de 28 dias.

A figura 18 apresenta a concentração de P_{Total} , $N-NO_3$ e $N-NKT$ nos substratos sólidos utilizados no crescimento das plantas, evidenciando variações nos teores de nutrientes entre os diferentes substratos. No solo orgânico, destaca-se uma concentração relativamente baixa de nitratos, com 1,6 mg NO_3/L , indicando uma disponibilidade limitada desse nutriente nesse solo específico. Por outro lado, nas lamas da ETAR sem a adição de biofertilizante

(Lamas+0%Bio), foi registada uma concentração inicial mais elevada, atingindo 6,7 mg NO₃/L, evidenciando um maior teor de azoto. Nas lamas com 5% de biofertilizante, observou-se uma quantidade ainda maior, chegando a 7,2 mg NO₃/L. Já nas lamas com 10% de biofertilizante, a concentração inicial foi de 4,6 mg NO₃/L, inferior ao teor presente na lama sem biofertilizante, o que pode estar relacionado com uma má homogeneização do biofertilizante nas lamas. No que diz respeito ao fósforo, no solo orgânico, verificou-se uma concentração considerável no solo orgânico, alcançando 17,6 mg P/L, evidenciando uma presença significativa desse nutriente. Por outro lado, nas lamas do ETAR, sem a adição de biofertilizante, os níveis de fósforo são ainda mais elevados, atingindo 52,5 mg P/L, o que revela um teor substancial deste nutriente nas lamas. Com a introdução de biofertilizante, mesmo em pequenas concentrações de 5% e 10%, observa-se uma ligeira redução nos níveis de fósforo total, indicando uma possível influência do biofertilizante na disponibilidade desse nutriente. Estas diferenças podem estar associadas ao facto de não se ter garantido uma amostra completamente homogénea (distribuição de quantidades equivalentes de lama e biofertilizante), já que as misturas não foram preparadas nas melhores condições. Essa análise sugere que a adição de biofertilizante, sem que se garanta uma boa mistura dos substratos, pode ter um efeito moderado na concentração de fósforo total e azoto, o que pode ser relevante para a gestão da fertilidade do solo e o crescimento das plantas.

A variação de N-NKT, conforme evidenciado na figura 18, aponta para uma possível transformação dos compostos orgânicos de azoto presentes nas lamas e no biofertilizante durante o período de crescimento das plantas. A decomposição desses resíduos pode libertar amónia ao longo do tempo, como sugerem as análises laboratoriais que revelaram um aumento gradual nas concentrações de N-NKT durante o crescimento das plantas com lamas da ETAR. Esse aumento progressivo pode indicar uma maior disponibilidade de nutrientes, o que reflete a eficácia no tratamento de águas residuais.

O incremento de N-NKT parece estar intimamente ligado à presença de lamas da ETAR nos substratos, não sendo possível aferir com precisão a contribuição do biofertilizante na mistura, uma vez que as concentrações de N-NKT são inferiores nas amostras Lamas+5%Bio e Lamas+10%Bio, relativamente à amostra Lamas+0%Bio, a partir do 7º dia de crescimento. Estas diferenças podem estar associadas ao facto de não se ter garantido uma amostra completamente homogénea (distribuição de quantidades equivalentes de lama e biofertilizante), já que as misturas não foram preparadas nas melhores condições. A contribuição do biofertilizante para a disponibilização de nutrientes para as plantas, além dos

nitratos já presentes, seria relevante para estimular um crescimento saudável das plantas, fornecendo uma fonte suplementar de azoto.

Não obstante, os resultados apontam para o uso das plantas de feijoeiro, não apenas para a melhoria da eficácia no tratamento de águas residuais, mas também para um potencial benefício agrícola do uso de biofertilizantes, o que pode ser fundamental para práticas sustentáveis na agricultura.

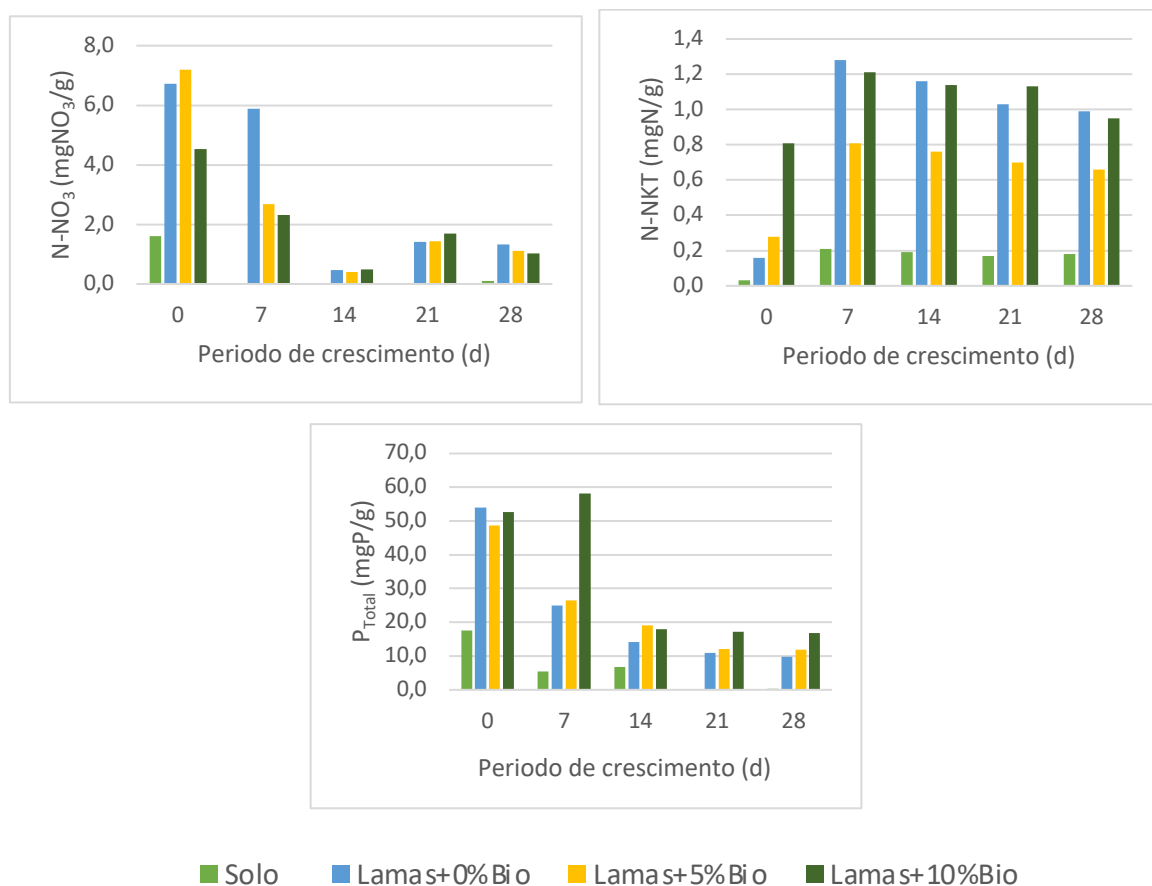


Figura 18. Variação da concentração de N-NO₃, N-NKT e P_{Total} durante o crescimento da alface em solo orgânico e nas lamas da ETAR, com e sem biofertilizante

Conforme se pode observar, ao longo do período de crescimento das plantas, registou-se uma redução de N-NO₃ e P_{Total} nos substratos, enquanto o teor de N-NKT foi superior ao valor inicial, após 28 dias de crescimento. Esta diminuição de nitratos e de fósforo total sugere que as plantas estão a absorver esses nutrientes do meio, o que se traduz numa remoção que pode ser observada de forma mais detalhada na tabela 14.

Tabela 14. Eficiência de remoção de N-NO₃ e P_{Total} no sistema de cultivo com substrato sólido.

	CONCENTRAÇÃO INICIAL		CONCENTRAÇÃO FINAL		EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO	
	N-NO ₃ (mg NO ₃ /L)	P _{Total} (mg P/L)	N-NO ₃ (mg NO ₃ /L)	P _{Total} (mg P/L)	N-NO ₃ (%)	P _{Total} (%)
Substrato Orgânico	1,6	17,6	0,11	0,23	93,1	98,7
Lamas 0%Bio	6,7	54,0	1,33	9,7	80,1	82,0
Lamas 5%Bio	7,2	48,6	1,11	11,9	84,6	75,5
Lamas 10%Bio	4,6	52,6	1,02	16,8	77,8	68,1

As variações da concentração de K, Ca e Mg nos substratos, durante o período de crescimento da alface, são apresentadas na figura 19.

Como se pode constatar, não foi possível determinar a concentração de K e Mg no início do crescimento. Os resultados das análises revelam um teor elevado destes metais, nos 4 substratos, ao final de 7 dias de crescimento das plantas. Ao longo do tempo, verificou-se uma diminuição significativa dessas concentrações nos sistemas com biofertilizante, tanto para o sistema com 5% quanto para o de 10%, alcançando o valor de 4 mg/g de amostra fresca no final do período de crescimento.

Pode afirmar-se que as lamas são adequadas para o crescimento natural e vigoroso das plantas, tendo em conta o conteúdo em compostos essenciais para o desenvolvimento vegetal. Isso fica evidente nas plantas cultivadas com lamas sem adição de biofertilizante (Lamas0%+Bio). No entanto, é interessante notar que, nas culturas com biofertilizantes, também é possível observar um elevado teor de potássio, como é o caso das lamas enriquecidas com 10% de biofertilizante. Por outro lado, as lamas com 5% de biofertilizante e aquelas sem adição não apresentam níveis significativos de potássio. Essa diferença pode ser atribuída tanto ao conteúdo de potássio nas lamas (5% de biofertilizante não ser significativo para alterar o conteúdo de base presente na lama) quanto à quantidade variável de biofertilizante utilizada em cada sistema, bem como a composição da amostra usada para análise.

Um teor mais elevado de biofertilizante parece ser especialmente relevante no crescimento saudável das plantas, considerando a capacidade de libertação de potássio por parte das plantas de feijoeiro (Galbiatti et al., 2011).

Essa prática seria particularmente benéfica se o feijoeiro absorverem absorvessem mais potássio do que necessitam, pois, o excedente desse nutriente poderia ser aproveitado por outras plantas, promovendo assim uma gestão mais eficiente e sustentável dos nutrientes no ambiente de cultivo (Figura 19).

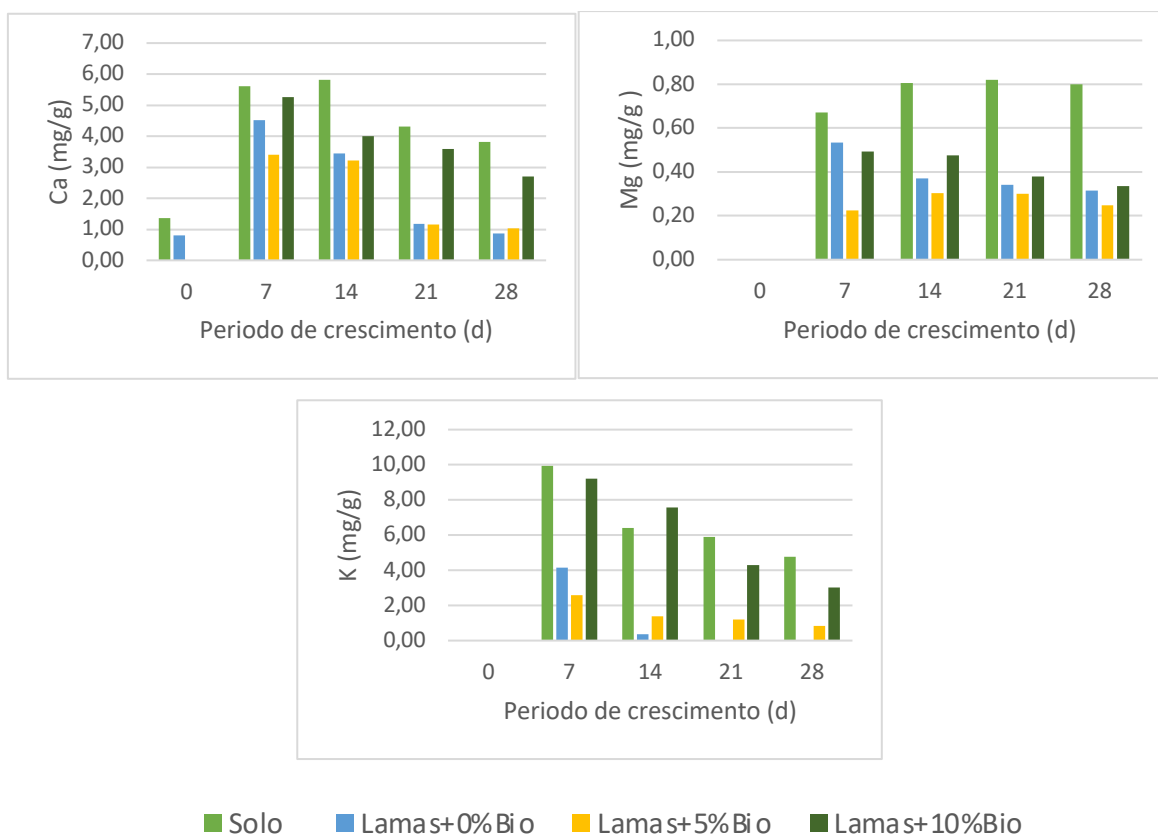


Figura 19. Variação da concentração de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K) durante o crescimento da alface em solo orgânico e em lamas da ETAR, com e sem biofertilizante.

Ao considerar o contexto das análises, é importante notar que as lamas provenientes de ETAR são conhecidas por conter uma alta concentração de nutrientes. No sistema de cultivo com lamas sem adição de biofertilizante (Lamas+0%Bio), observou-se um crescimento robusto das plantas de alface, atingindo uma média de altura de 12 cm, com aproximadamente 7 folhas por planta, conforme evidenciado na figura 20.

Observaram-se variações significativas no desenvolvimento das plantas nos sistemas que receberam biofertilizante de feijão, com concentrações de 5% e 10%, respetivamente. No sistema com 5% de biofertilizante, o crescimento médio em altura das plantas foi menor,

alcançando uma média de 10 cm, com um total de 5 folhas por planta. Em contrapartida, no sistema com 10% de biofertilizante, houve um crescimento mais vigoroso, com uma média de altura de 12 cm e 7 folhas por planta como se pode verificar na figura 20.

É interessante notar que, em comparação com os sistemas de lamas, o solo orgânico não demonstrou uma evolução significativa no crescimento das plantas de alface. Neste caso, a altura média das plantas foi de apenas 6 cm, com um total de 4 folhas por planta. Esses resultados sugerem que a presença e a concentração do biofertilizante de feijão podem desempenhar um papel crucial no estímulo ao crescimento das plantas em sistemas de cultivo com lamas da ETAR, enquanto o solo orgânico pode não oferecer as mesmas condições favoráveis para o desenvolvimento das plantas.

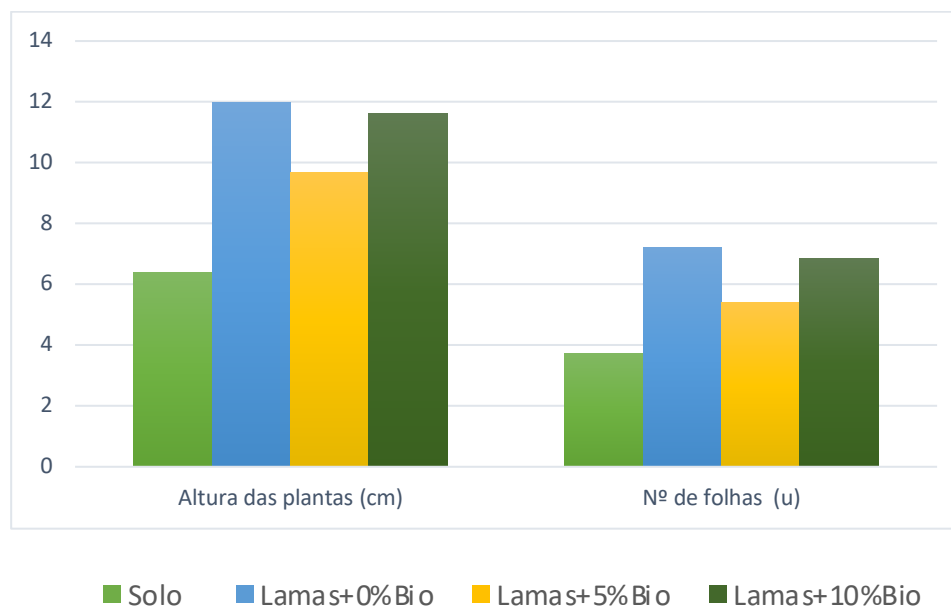


Figura 20. Variação média de altura das plantas e do nº de folhas durante o crescimento da alface em solo orgânico e em lamas da ETAR, com e sem biofertilizante.

A massa das plantas de alface (parte aérea) obtida nos sistemas de cultivo testados e o respetivo teor de humidade são apresentados na figura 21. Verifica-se que a massa das plantas (fresca ou seca) foi mais elevada quando o cultivo da alface ocorreu nas lamas da ETAR, com e sem biofertilizante, nomeadamente: 120 g massa fresca (Lamas+0%Bio), 40g (Lamas+5%Bio) e 94 g (Lamas+10%Bio) *versus* 12 g (Solo). Também neste caso, o teor de humidade das folhas de alface foi mais elevado (>91% no cultivo em lamas, com e sem fertilizante, *versus* 82% no cultivo em solo orgânico). Este resultado está provavelmente

associado ao facto de o solo orgânico disponibilizar uma quantidade moderada de água (em média, 58%); e as lamas sem biofertilizante e com 5% e 10% de biofertilizante, constituírem um ambiente de cultivo com maior humidade (em média, 71%). Esse elevado teor de humidade pode ser atribuído à capacidade de retenção de água pelas lamas. Essas variações nos teores de humidade entre as lamas e o solo orgânico refletem a diversidade de condições ambientais e de cultivo entre os diferentes sistemas, influenciando diretamente o desenvolvimento e a saúde das plantas de alface.

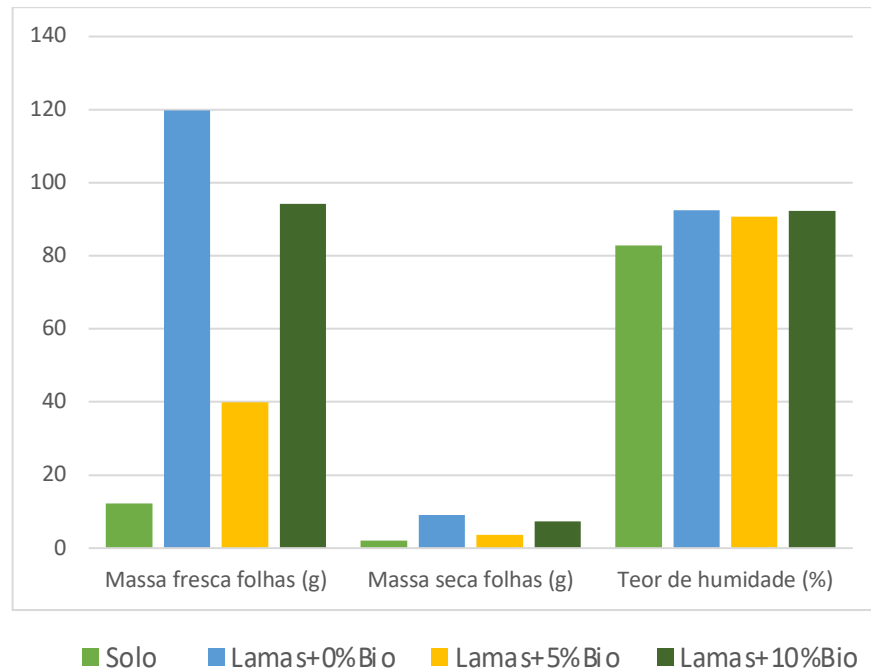


Figura 21. Resultados da avaliação da massa fresca, massa seca e do teor de humidade das plantas de alface.

6. Conclusões e sugestões para trabalho futuro

A utilização da água residual tratada como substrato e o cultivo em lamas de ETAR permitiu avaliar a sua viabilidade na produção de espécies com potencial para biofertilização, tanto no sistema hidropónico simples como em solo. Os resultados demonstram boa produtividade da planta do feijoeiro, recorrendo à água residual e às lamas proveniente da ETAR da Base Aérea N. °5, e a sua capacidade de retenção de nutrientes, resultando na redução significativa da carga de nitratos e fosfatos nas águas residuais e nas lamas. Isso ressalta a sua importância na descontaminação, mostrando-se uma ferramenta valiosa tanto em sistemas de hidroponia quanto em sistemas em solo, que utilizam lamas de ETAR.

A utilização do feijoeiro como uma solução eficaz na absorção e fixação de nitratos e fosfatos e potássio (em AR e em lamas), revela o seu potencial como biofertilizante.

A avaliação da qualidade da água utilizada no processo hidropónico e das lamas usadas no cultivo em solo evidenciou a eficácia dos bioprocessos durante o crescimento das plantas na remoção de nutrientes, como azoto e fósforo. Embora tenham sido identificadas algumas limitações na comparação entre o crescimento das plantas em solução nutritiva e em água residual, os resultados sugerem que tanto as lamas quanto a água residual podem servir como fontes primárias de nutrientes para as plantas, indicando uma potencial alternativa para o aproveitamento desses recursos.

No que se refere à produção de plantas para alimentação humana ou animal, os resultados relativos à cultura de alface destacaram o papel benéfico do biofertilizante, especialmente em sistemas com 10% de biofertilizante no total de substrato sólido, contribuindo não apenas para o crescimento das plantas, mas também para a redução das concentrações de nitratos nas lamas da ETAR. Os resultados demonstram ainda que as lamas da ETAR da Base Aérea N°5, com ou sem biofertilização, são adequadas para o crescimento de alfaces, pois apresentam os nutrientes necessários para o crescimento das plantas. No entanto, é de realçar a importância do uso de biofertilizantes como uma estratégia sustentável para o cultivo de alimentos, visando a melhoria da qualidade dos produtos agrícolas e a preservação do meio ambiente.

Existem diversas estratégias para recuperar e reutilizar as águas residuais e as lamas das ETAR, visando estabelecer uma circularidade da água na produção de cultivos e

biofertilizantes. Essas práticas contribuem não apenas para a melhoria da qualidade dos solos agrícolas, mas também para a redução da necessidade de fertilizantes inorgânicos.

Dessa forma, a pesquisa nessas áreas é essencial para desenvolver práticas agrícolas mais sustentáveis, que visam proteger os recursos hídricos, o meio ambiente e promovam a produção de alimentos de qualidade.

Recomenda-se, de futuro, a realização de estudos abrangentes sobre a presença de contaminantes emergentes nas plantas cultivadas em água residual tratada e lamas da ETAR, com especial atenção para aqueles que possam representar potenciais riscos à saúde humana. Esses estudos devem investigar não apenas a presença dos contaminantes, mas também seus possíveis efeitos cumulativos e de longo prazo no ecossistema e na saúde humana e de animais.

Além disso, sugere-se a condução de pesquisas focadas na avaliação dos efeitos a longo prazo do uso de biofertilizantes derivados de águas residuais tratadas nas culturas alimentares. Esses estudos são essenciais para acautelar eventuais impactos ambientais, e garantir a segurança alimentar e a proteção da saúde pública, pois ajudarão a determinar os possíveis impactos na qualidade e na segurança dos alimentos produzidos com esses biofertilizantes.

No contexto concreto do caso de estudo, recomenda-se uma gestão integrada destes subprodutos na Base Área N° 5 de Monte Real. Isso inclui a adoção de práticas de reciclagem de nutrientes e a valorização de subprodutos orgânicos, visando reduzir o desperdício e valorização dos recursos. Essas iniciativas contribuirão não só para a sustentabilidade ambiental, mas também gerarão benefícios económicos e sociais significativos, promovendo uma economia circular na base aérea que pode ser replicada noutras instalações similares.

Referências Bibliográficas

- Almeida, D. M. A. (2020). *Reutilização de água residual em sistemas de hidroponia* [Universidade Nova de Lisboa]. Acesso em: 6 jul. 2023 https://run.unl.pt/bitstream/10362/104942/1/Almeida_2020.pdf
- Amaya, A., & Cruz, L. (2016). Diseño e implementación de un control de pH, conductividad y monitoreo del nivel de agua para el cuidado cultivos hidropónicos de uso doméstico. In *Universidad Distrital Francisco José de Caldas* (p. 14). <http://hdl.handle.net/11349/3811>
- Arnaldos, D. B. (2012). *Reutilización de aguas residuales domésticas. Estudio y comparativa de tipologías edificatorias: Depuradoras naturales como alternativa sostenible*. [Universidad de Alicante]. <http://hdl.handle.net/10045/29576>
- Arroyo, W. F. A., Torres, C. M. T., Salinas, A. A. M., Santillán, D. F. N., Rivera, L. A. M., Párraga, A. G. D., Quispe, C. E. P., Verdezoto, A. K. P., Cevallos, F. J. B., Castillo, W. A. V., & Jackson, T. (2020). Biological Control: A tool for sustainable agriculture, a point of view of its benefits in Ecuador. *Journal Of The Selva Andina Biosphere*, 8(2), 128–149. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2020.080200128>
- Base Aérea N°5. (2019). *Declaração Ambiental 2019 Base Aérea N°5 - Monte Real*. https://www.emfa.pt/paginas/certificacaoambiental_institucional_fap/ficheiros/Declaração Ambiental 2019.pdf
- Basso, J. M., Takahashi, H. W., & Fregonezi, G. A. de F. (2012). Bean-pod cultivation in pots with different substrates and electrical conductivity of nutrient solution. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(6), 2149–2161. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n6p2149>
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía* (E. de la U. N. de La Plata (ed.); 1st ed.). <https://doi.org/10.35537/10915/46752>
- Bettiol, W., & Camargo, O. A. de. (2006). Disposição de lodo de esgoto em solo agrícola: Instrumental para o Pensamento. In *Embrapa Meio Ambiente* (pp. 25–36). Embrapa Meio Ambiente. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/14956>

- Castillo, F., Molina, L. G., Pérez, E. del C. M., Pineda, J. P., & González, C. E. R. (2014). Nutritional dynamics and yield of cucumber grown in hydroponics with and without recirculation of the nutrient solution. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 261–269. <https://doi.org/10.35196/rfm.2014.3.261>
- Decreto-Lei n.o 118/2006, 21 de junho, Pub. L. No. Diário da República n.o 118/2006, Série I de 2006-06-21: Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 21 (2006). <https://diariodarepublica.pt/dr/analise-juridica/decreto-lei/118-2006-371037>
- Decreto-Lei n.o 119/2019, de 21 de agosto, Pub. L. No. Diário da República n.o 159/2019, Série I de 2019-08-21: Presidência do Conselho de Ministros, 21 (2019). <https://dre.pt/home/-/dre/124097549/details/maximized>
- Decreto-Lei n.o 236/98, de 1 de agosto, Pub. L. No. Diário da República n.o 176/1998, Série I-A de 1998-08-01:Ministério do Ambiente, 3676 (1998). <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/236/1998/08/01/p/dre/pt/html>
- Decreto-Lei n.o 276/2009 de 2 de outubro, Pub. L. No. Diário da República n.o 192/2009, Série I de 2009-10-02 :Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 7154 (2009). <https://dre.pt/pesquisa/-/search/490974/details/maximized>
- Esteva, A. G., Shibata, J. K., Castillo, G. A. B., & Estrada, J. A. S. E. (2003). Yield and Dry Matter Partition of a Common Bean Variety in a Hydroponic System and Soil. *Terra Latinoamericana*, 21(4), 471–480. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57321403.pdf>
- Fageria, N. K., Oliveira, I. P. de, & Dutra, L. G. (1996). *Deficiências nutricionais na cultura do feijoeiro e suas correções* (EMBRAPA-CNPAF-APA (ed.)). Acesso em: 8 Out. 2023 <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/203309/1/doc65.pdf>
- FAO. (2002). *Los Fertilizantes y su uso* (4th ed.). Acesso em: 16 de Sep. 2023. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d81ae4cf-54e9-421d-8bac-d36719b2eaf0/content>
- Fernandez, V., & Eichert, T. (2009). Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(1–2), 36–68. <https://doi.org/10.1080/07352680902743069>

- Fonseca, B. S. de O., & Sousa, H. A. N. F. de. (2021). *Hidroponia - Técnica Sustentável de Cultivo*. [https://bdigital.ipg.pt/dspace/bitstream/10314/5303/1/Beatriz Fonseca - Projecto.pdf](https://bdigital.ipg.pt/dspace/bitstream/10314/5303/1/Beatriz_Fonseca_-_Projecto.pdf): Universidad de la guarda
- Filippi, R. D. (2018). Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Universidad de Frontera.
- Fuster, C. N. M., & Caro, K. G. M. (2020). *Revisión Sistemática: Reaprovechamiento de Aguas Residuales* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/63539>
- Galbiatti, J. A., Silva, F. G. da, Franco, C. F., & Caramelo, A. D. (2011). Development of Bean with the use of mineral fertilization and biofertilizer. *Engenharia Agrícola*, 31(1), 167–177. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1764-0_92
- Gonçalves, J. C. (2017). *Análise das tecnologias correntes para o tratamento e secagem de lamas de ETAR* [Universidade de Coimbra]. <https://hdl.handle.net/10316/82967>
- Haddad, M., & Mized, N. (2011). Evaluation of various hydroponic techniques as decentralised wastewater treatment and reuse systems. *International Journal of Environmental Studies*, 68(4), 461–476. <https://doi.org/10.1080/00207233.2011.582701>
- Hazel, T. da C. C. (2015). *Gestão de Lamas Fecais em Sistemas Urbanos de Saneamento Local* [Técnico de Lisboa]. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/mec/dissertacao/1972678479052824>
- Iacovidou, E., Millward-Hopkins, J., Busch, J., Purnell, P., Velis, C. A., Hahladakis, J. N., Zwirner, O., & Brown, A. (2017). A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1279–1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.002>
- Mahapatra, D. M., Satapathy, K. C., & Panda, B. (2022). Biofertilizers and nanofertilizers for sustainable agriculture: Phycoprosects and challenges. *Science of the Total Environment*, 803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149990>

- Malta. (2001). *Aplicação de Lodos de Estações de Tratamento de Esgotos na Agricultura: estudo do caso do município de Rio das Ostras-RJ*. Brasil Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública.
- Marin, E., & Rusănescu, C. O. (2023). Agricultural Use of Urban Sewage Sludge from the Wastewater Station in the Municipality of Alexandria in Romania. *Water (Switzerland)*, 15(3), 458. <https://doi.org/10.3390/w15030458>
- Meneses, R. M. de A. O. (2023). Valorização agrícola de lamas de ETAR [Instituto Politécnico de Bragança]. In *Agência Portuguesa do Ambiente*. <https://www.apambiente.pt/?ref=16&subref=84&sub2ref=972&sub3ref=1264>
- Monte, H. M. dos, Santos, M. T., Barreiros, A. M., & Albuquerque, A. (2016). *Tratamento de águas residuais: operações e processos de tratamento físico e químico* (Lisboa: ERSAR, ISEL, & U. da B. Interior (eds.); 1st ed.). <https://doi.org/10.36599/qped-978-65-5376-220-6>
- Nieto, M. I. V., Garcia, F. D. G., & Rosales, D. O. M. (2011). Agricultura comercial, tradicional y vulnerabilidad en campesinos. *Política y Cultura*, 36, 71–98. <https://www.scielo.org.mx/pdf/polcul/n36/n36a4.pdf>
- Nóbrega, J. Q., Rao, T. V. R., Beltrão, N. E. de M., & Filho, J. F. (2001). Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 5(3), 437–443. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662001000300012>
- Oliva, C. V. (2017). *Problemas ambientales y de salud derivados del uso de fertilizantes nitrogenados* [Universidade Complutense]. [http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/CRISTINA VEGA OLIVA.pdf](http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/CRISTINA%20VEGA%20OLIVA.pdf)
- Oliveira, D. C. da S., Azevedo, P. G. F. de, & Cavalcanti, L. A. P. (2021). Processos biológicos para o tratamento efluentes : uma revisão integrativa de. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 8(18), 397–415. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2021\)081826](https://doi.org/10.21438/rbgas(2021)081826)
- Parlamento Europeu. (2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*. Acesso em: 12 dez 2023 <https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/5/story/20151201STO05603/2>

- Patten, G. F. (2012). *Hydroponic Basics by George F. Van Patten*. Van Patten Publishing.
- Pereira, M. M. (2019). *Frequência e doses de biofertilizantes via fertirrigação no cultivo de bananeira e sua relação com os atributos do solo* [Universidade Federal do Recôncavo da Bahia]. https://www.ufrb.edu.br/pgea/images/Teses/MONIKUELLY_MOURATO_PEREIRA.pdf
- Perry, T. A. (2020). *Avaliação da Remoção de Azoto por Nitrificação e Desnitrificação Simultânea Caso de Estudo: ETAR da Base Aérea nº5* [Universidade Nova de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10362/104943>
- Rebello, L. A. M. (2015). *Hidroponia em Ambiente Controlado: desenvolvimento de uma metodologia de análise ao desempenho produtivo e aos consumos de uma unidade de produção* [Universidade de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10451/22292>
- Ríos, T. A. D. (2021). Circularity of water: a sustainable management model for Panamanian society. *Revista Saberes APUDEP*, 4(2), 17. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/223/2232266001/index.html>
- Rivera, A. P. T., Vargas, I. J. P., Ríos, A. E. M., Beebe, S., & Tofiño-Rivera, R. (2016). Rendimiento, estabilidad fenotípica y contenido de micronutrientes de frijol biofortificado en el Caribe seco colombiano. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 309–329. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:511
- Rocha, B. F. S. (2020). *Valorização de efluentes urbanos. Caso de estudo Base Área N.º 5, Monte Real* [Universidade Nova de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10362/163765>
- Sánchez, R. S. (2015). Sustainable agriculture and possibilities in relation to urban consumers. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 23(45), 28. <https://doi.org/10.24836/es.v23i45.184>
- Santos, M. E. M., Peña-Valdivia, C. B., García-Esteva, A., Aguilar-Benítez, G., & Kohashi-Shibata, J. (2017). Seed and seedlings physical characteristics and seeds germination of wild and domesticated common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and their progeny. *Agrociencia*, 51(1), 43–62. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30249773005.pdf>

- Souza, A. S., & Araújo, L. E. B. de. (2019). Green Revolution: The Scenario Its Monoculture And Search For A Greener In Agroecology. *Congresso Internacional de Direito e Contemporaneidade*, 16. <https://www.ufsm.br/cursos/pos-graduacao/santa-maria/ppgd/congresso-direito-anais>
- Theilig, S. L. (2015). *Eliminacion de nutrientes mediante el empleo de cultivos hidroponicos* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39528>.
- Torres, J. L. R., Araújo, A. S., Gasparini, B. D. N., Silva, V. R., Barreto, A. C., Tamburús, A. Y., & Vieira, D. M. da S. (2015). Desempenho da Alface Americana e do Repolho Sobre Diferentes Resíduos Vegetais. *Global Science and Technology*, 8(2), 87–95. <https://doi.org/10.14688/1984-3801/gst.v8n2p87-95>
- Ulibarry, P. G. (2019). Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes. Asesoría Técnica nutrición Parlamentaria. In *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile* (p. 5). Asesoría Técnica Parlamentaria. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias_ambientales_de_la_aplicacion_de_fertilizantes.pdf
- Yanil, V. V. (2022). *Cultivo hidropónico como alternativa sostenible a cultivos tradicionales*.
- Zabotto, A. R., Zuñiga, E. A., Machuca, L. M. R., Broetto, F., Tavares, A. R., & Kanashiro, S. (2019). Uso de lodos residuales como fertilizante en eucalipto - diagnóstico de investigación. *Idesia*, 37(2), 103–108.