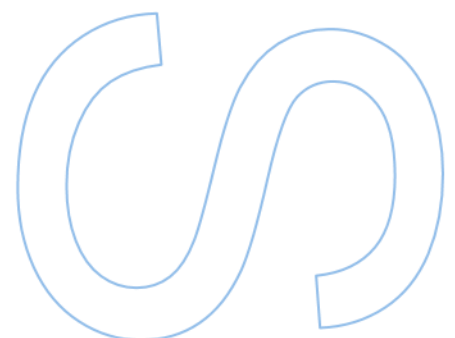
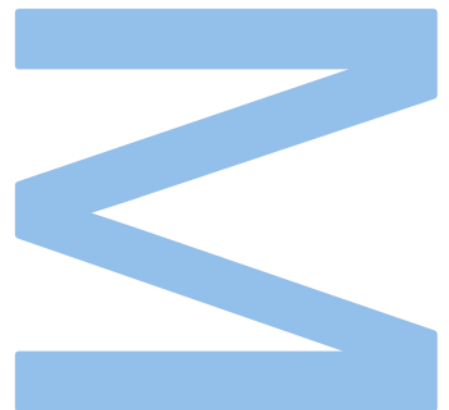


Valorização de Resíduos Orgânicos na Formulação de Substratos com Casca de Pinheiro como Alternativa à Fibra de Coco



Marta Francisca Gaspar Pereira

Mestrado em Engenharia Agronómica

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

2025

Valorização de Resíduos Orgânicos na Formulação de Substratos com Casca de Pinheiro como Alternativa à Fibra de Coco

Marta Francisca Gaspar Pereira

Relatório de Estágio realizado no âmbito do Mestrado em Engenharia Agronómica

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2025

Orientador

Professor Doutor Mário Campos Cunha, Professor Associado

Supervisor na Lipor

Dr. Telmo Machado



Aos meus avós,
Rui Alberto e Maria Clara

Agradecimentos

Quero começar por agradecer ao Professor Mário Cunha, pela orientação, disponibilidade e apoio constante ao longo desta jornada.

À Lipor – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto, o meu sincero obrigado por ter aberto portas e disponibilizado todos os recursos necessários. Um carinho especial ao Departamento de Inovação, Investigação e Desenvolvimento, pelo acolhimento caloroso e pela simpatia desde o primeiro dia.

À equipa do CEL, expresso a minha profunda gratidão. Um agradecimento especial ao Telmo e João Nunes pela supervisão, e também ao Philip, João, Rafael, Abel pela ajuda incansável e pela boa disposição que tornaram a rotina muito mais leve.

Aos meus pais, avós e irmãos, obrigada por nunca me deixarem desistir porque mesmo no meio do caos, trouxeram-me sempre tranquilidade e apoio incondicional.

Ao meu padrinho Celestino, que acreditou em mim desde o início e me acompanhou pacientemente nesta aventura que foi a dissertação.

E, finalmente, ao Christian, agradeço de coração pelo companheirismo, pelo exemplo e pelo carinho que me sustentaram nos momentos mais desafiantes, sendo sempre o meu porto seguro.

Sem todos vocês, esta jornada não teria sido possível.

Obrigada de coração!

Resumo

A valorização de resíduos orgânicos constitui uma estratégia para promover a economia circular e reduzir a dependência de matérias-primas importadas. A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito de um estágio curricular realizado na LIPOR – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto, entidade responsável pela gestão e valorização de resíduos urbanos, nomeadamente através da produção de corretivos orgânicos para uso agrícola.

A LIPOR produz o Nutrimais, um composto orgânico obtido a partir da valorização de resíduos biodegradáveis, como resíduos verdes e biorresíduos, caracterizado por um elevado teor de matéria orgânica estabilizada e pela presença de macro e micronutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas. O Nutrimais é utilizado na agricultura e horticultura como corretivo orgânico do solo, fertilizante e componente de substratos, contribuindo para a melhoria da fertilidade, da retenção de água e da estrutura dos solos.

Neste contexto, esta dissertação avaliou a viabilidade da utilização da casca de pinheiro como alternativa à fibra de coco na formulação de substratos hortícolas. Para tal, desenvolveram-se diferentes misturas, incorporando casca de pinheiro em diferentes proporções, complementadas com Nutrimais, e compararam-se os seus efeitos no crescimento de alface (*Lactuca sativa* L.) e couve chinesa (*Brassica rapa* var. *pekinensis*).

Os resultados demonstraram que as propriedades físico-químicas dos substratos variaram com a granulometria e a composição das misturas, influenciando a disponibilidade de nutrientes, a retenção de água e o arejamento. O tratamento T3 (40% casca de pinheiro + 20% Nutrimais) destacou-se como a formulação mais equilibrada, apresentando melhores resultados nos parâmetros de crescimento vegetativo, biomassa e índice SPAD, sobretudo na couve chinesa. Na alface, as propriedades físicas do substrato mostraram maior influência, com o controlo (fibra de coco) a apresentar melhor desempenho.

Conclui-se que a casca de pinheiro é uma matéria-prima promissora para a formulação de substratos hortícolas sustentáveis, assegurando competitividade agronómica e reduzindo a dependência de recursos importados, contribuindo simultaneamente para a valorização de resíduos e para a redução da pegada de carbono do setor agrícola.

Palavras-chave: *Brassica rapa* var. *pekinensis*; Crescimento Vegetativo; Economia circular; Impacto Ambiental; *Lactuca sativa* L.; Nutrimais; Substratos.

Abstract

The valorization of organic waste is a key strategy to promote the circular economy and reduce dependence on imported raw materials. This dissertation was developed within the framework of a curricular internship carried out at LIPOR – the Intermunicipal Waste Management Service of Greater Porto, an entity responsible for the management and valorization of municipal solid waste, particularly through the production of organic soil amendments for agricultural use.

LIPOR produces Nutrimais, an organic compost obtained from the valorization of biodegradable waste, such as green waste and biowaste, characterized by a high content of stabilized organic matter and the presence of macro- and micronutrients essential for plant development. Nutrimais is used in agriculture and horticulture as a soil organic amendment, fertilizer, and component of growing substrates, contributing to improved soil fertility, water retention, and soil structure.

Within this context, this dissertation evaluated the feasibility of using pine bark as an alternative to coconut coir in the formulation of horticultural substrates. To this end, different substrate mixtures were developed, incorporating pine bark at different proportions, supplemented with Nutrimais, and their effects on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *pekinensis*) were compared.

The results showed that the physicochemical properties of the substrates varied with particle size distribution and mixture composition, influencing nutrient availability, water retention, and aeration. Treatment T3 (40% pine bark + 20% Nutrimais) stood out as the most balanced formulation, showing higher values for vegetative growth parameters, biomass, and SPAD index, particularly in Chinese cabbage. In lettuce, the physical properties of the substrate were more influential, with the control (coconut coir) showing better performance.

It is concluded that pine bark is a promising raw material for sustainable horticultural substrate formulations, ensuring agronomic competitiveness while reducing dependence on imported resources. Its use contributes to the valorization of abundant residues in Portugal and to the reduction of the agricultural sector's carbon footprint.

Keywords: *Brassica rapa* var. *pekinensis*; Vegetative growth; Circular economy; Environmental impact; *Lactuca sativa* L.; Nutrimais; Substrates.

Índice

Lista de Figuras	vii
Lista de Abreviaturas	ix
Capítulo I - Introdução	10
Capítulo II – Apresentação da Empresa	12
2.1 Lipor.....	12
2.2 Produtos Lipor	14
2.2.1 Produtos resultantes da valorização de resíduos	14
2.2.2 Serviços disponibilizados pela Lipor.....	16
2.3 Gestão de resíduos orgânicos - CVO e o processo de compostagem	17
2.4 Substratos Nutrimais.....	19
2.4.1 Produtos e matérias-primas	20
Capítulo III – Revisão Bibliográfica.....	22
3.1 Conceito e evolução do cultivo sem solo	22
3.2 Benefícios e limitações dos sistemas sem solo	22
3.3 Cultivo com substratos	23
3.4 Propriedades físicos dos substratos	23
3.4.1 Granulometria	24
3.4.2 Porosidade total e capacidade de arejamento	24
3.4.4 Retenção de água.....	25
3.4.5 Densidade aparente.....	26
3.4.6 Compactação.....	27
3.5 Propriedades químicas dos substratos	27
3.5.1 Matéria orgânica	27
3.5.2 pH.....	28
3.5.3 CTC	28
3.5.4 CE e Salinidade	28

3.5.5 Disponibilidade de nutrientes	28
3.6 Substrato ideal	29
3.6.1 Matérias-primas utilizadas nos substratos.....	31
3.6.2 Propriedade económicas dos substratos	36
3.6.3 Propriedade ambientais dos substratos	37
3.6.4 Parâmetros para avaliar a qualidade de um substrato	38
Capítulo IV- Materiais e Métodos	40
4. 1 Delineamento experimental.....	40
4.2 Matérias-primas utilizadas na formulação dos substratos.....	40
4.3 Preparação dos substratos.....	41
4.4 Espécies utilizadas no ensaio.....	42
4.5 Instalação e condução do ensaio	42
4.6 Cuidados, regas e tratamentos fitossanitários	43
4.7 Medições do crescimento das plantas.....	44
4.8 Características físico-químicas dos substratos	46
4.9 Delineamento experimental e processamento estatístico	46
Capítulo V - Resultados e Discussão	48
5.1 Características dos substratos	48
5.2 Ensaio da cultura da alface	50
5.2.1 Crescimento vegetativo.....	50
5.2.2 SPAD.....	53
5.2.3 Produção de biomassa fresca e seca	54
5.2.4 Grau Brix	55
5.3 Ensaio da cultura da couve chinesa	57
5.3.1 Crescimento vegetativo.....	57
5.3.2 SPAD.....	59
5.3.3 Produção de biomassa fresca e seca	61
5.3.4 Grau Brix	62
Capítulo VI- Conclusão	64

Anexos	1
--------------	---

Lista de Tabelas

Tabela 1 Lista de matérias-primas	21
Tabela 3 Valores de referência propostos por De Boodt e Verdonck (1972) e valores obtidos em diferentes materiais utilizados como substratos de cultivo.	25
Tabela 4 Valores ótimos para propriedades químicas de substratos (adaptado de Abad et al., 2004).....	29
Tabela 5 Comparação entre valores bibliográficos e dados do fornecedor da Lipor para fibra de coco	31
Tabela 6 Comparação entre valores bibliográficos de diferentes tipos de turfa (Abad, 2004) e dados do fornecedor Floragard (2021).....	32
Tabela 7 Comparação entre valores bibliográficos de perlite (Abad, 1995) e dados fornecidos pela Perlindustria (Perlite V12).	33
Tabela 8 Propriedades físicas de casca de pinheiro adaptado do Manual de cultivo sem solos (1 Abad et al., 2004; 2 Miner, 1994; 3 Reis et al., 2005).	34
Tabela 9 Principais características do Nutrimais (valores indicados pelo Lipor).....	36
Tabela 10 Formulação dos substratos utilizados no ensaio, com diferentes proporções de fibra de coco, casca de pinheiro, turfa loira, perlite e Nutrimais.....	40
Tabela 11 Principais características físico-químicas dos substratos.	48
Tabela 12 Distribuição granulométrica dos substratos.	49
Tabela 13 Peso fresco (PF) e seca (PS) da alface (média $\pm$ desvio padrão, g) para folhas, caule, raízes e total, nos diferentes tratamentos. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	55
Tabela 14 Peso fresco (PF) e seca (PS)(g) da couve chinesa (média $\pm$ desvio padrão, g) para folhas, caule, raízes e total, nos diferentes tratamentos. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	62

Lista de Figuras

Figura 1 Municípios que integram a Lipor	12
Figura 2 Fluxos de encaminhamento dos resíduos (Fonte: LIPOR, Plano Estratégico da Lipor 2007-2016, Porto, 2007).	14
Figura 3 Escórias na CVE, Fonte autora.....	15
Figura 4 Ecoponto doméstico feito com plásticos reciclados de mesas e cadeiras em fim de vida (Fonte: Jornal Novo Regional, 2024).	16
<i>Figura 5 (i) e (ii) Restos alimentares e resíduos verdes provenientes da recolha seletiva; (iii) Materiais submetidos à crivagem inicial (Fonte: autora).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6 Túneis de compostagem (Fonte: LIPOR, 2024)</i>	<i>18</i>
Figura 7 Composto finalizado em repouso, aguardando testes laboratoriais e posterior embalamento, Fonte autora	19
<i>Figura 8 Substratos Nutrimais.....</i>	<i>20</i>
Figura 9 Características físicas de substratos constituídos com partículas de granulometria determinada, obtida da trituração de casca de pinheiro (Pinus radiata) (fonte; Handreck, 1983)	24
Figura 10 Escolha de um substrato. Adaptado de Manual de cultivo sem solo: Aspectos teóricos e práticos dos cultivos hidropónicos (p. 135), de M. Louro & M. Reis, 2004, Lisboa: Quântica Editora.....	30
Figura 11 Envasamento do ensaio.....	41
Figura 12 Processo de construção da estufa e disposição dos vasos na estufa	43
Figura 13 Disposição do sistema de rega	44
Figura 14 (i) Lavagem das raízes, (ii) Folhas, caules e raízes na secagem em estufa	45
Figura 15 Pesagem na balança analítica	45
Figura 16 Médias da variável do diâmetro(cm) a meio do ensaio (i) e no final (figura ii) da alface para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	50
Figura 17 Médias feitas no final do ensaio da variável altura (cm) e para os diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	51
Figura 18 Número de folhas da alface para os diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	52
Figura 19 Médias da variável SPAD final do ensaio da alface para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	53
Figura 20 Médias da variável Brix da planta de alface para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	56

Figura 21 Médias da variável do diâmetro(cm) a meio do ensaio (i) e no final (figura ii) da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	57
Figura 22 Médias da variável da altura (cm) da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	58
Figura 23 Número de folhas da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	59
Figura 24 Médias da variável do SPAD da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	60
Figura 25 Médias da variável Brix da planta da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão	63

Lista de Abreviaturas

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANOVA	Análise de Variância
CE	Condutividade Elétrica
CEL	Centro de Experimentação Lipor
CSS	Cultivo Sem Solo
CTC	Capacidade de Troca Catiónica
CVE	Central de Valorização Energética
CVO	Central de Valorização Orgânica
DAP	Densidade Aparente
FAO	Food and Agriculture Organization
MS	Matéria Seca

Capítulo I - Introdução

A gestão de resíduos urbanos constitui um dos principais desafios ambientais da atualidade. O crescimento populacional, a intensificação da urbanização e as alterações nos padrões de consumo têm conduzido a um aumento contínuo da sua produção, tornando indispensável a procura de soluções que promovam a valorização destes materiais e a sua integração em modelos de economia circular. Entre os diferentes fluxos gerados, os resíduos orgânicos assumem especial relevância, não apenas pelo volume expressivo que representam, mas também pelo elevado potencial de reaproveitamento na criação de novos produtos (Roy et al., 2023)

Uma das formas de valorização consiste na utilização destes resíduos para a formulação de substratos hortícolas. Atualmente, grande parte dos substratos disponíveis no mercado utiliza a fibra de coco e turfa como componentes principais (Grasselly, 2009; Sangaré et al., 2011). No entanto, este material apresenta limitações relevantes, uma vez que é maioritariamente importado, depende de transportes de longa distância e exige processos de extração e tratamento que implicam elevado consumo de água e energia, resultando num impacto ambiental e económico significativo. Por esta razão, a identificação de alternativas mais sustentáveis e de origem local revela-se fundamental.

A casca de pinheiro, abundante em Portugal, apresenta-se como uma dessas alternativas. A sua utilização, parcial ou total, em substituição da fibra de coco, permite reduzir custos de produção e impactos ambientais, ao mesmo tempo que valoriza um recurso florestal nacional com aproveitamento limitado. Apesar deste potencial, a informação disponível sobre o desempenho da casca de pinheiro em diferentes formulações de substratos, bem como sobre a resposta das plantas ao seu uso, é ainda escassa. A maioria dos estudos existentes concentra-se em materiais como turfa e fibra de coco, havendo escassez de dados experimentais sobre as propriedades físico-químicas da casca de pinheiro, a sua interação com compostos orgânicos (como o Nutrimais) e o impacto dessas formulações no crescimento e produtividade das culturas hortícolas. Esta lacuna de conhecimento impede a definição de recomendações técnicas sólidas sobre a sua utilização em larga escala.

Foi a partir desta necessidade que se desenvolveu o presente projeto, em colaboração com a Lipor - Serviço Intermunicipalizado para a Gestão Sustentável de Resíduos do Grande Porto – é entidade responsável pela gestão e valorização de resíduos urbanos através de processos como a compostagem e a triagem de materiais recicláveis. Entre os produtos obtidos pela empresa destaca-se o Nutrimais, resultante da compostagem de resíduos biodegradáveis, que serve como referência para a formulação de novas misturas.

Deste modo, pretende-se determinar em que medida a casca de pinheiro pode substituir a fibra de coco sem comprometer a qualidade agronómica dos substratos, assegurando simultaneamente vantagens ambientais e económicas. Parte da hipótese que a casca de pinheiro, quando utilizada em substituição parcial ou total da fibra de coco e combinada com Nutrimais, pode originar substratos com propriedades físico-químicas adequadas ao cultivo hortícola, promovendo crescimento vegetal e produtividade equivalentes ou superiores aos obtidos com substratos convencionais, ao mesmo tempo que reduz o impacto ambiental e económico da produção

Este trabalho tem como objetivos: i) avaliar a viabilidade da utilização da casca de pinheiro em diferentes formulações de substratos e (ii) verificar a possibilidade de desenvolver misturas com propriedades equivalentes às do Nutrimais Universal, mas com menor dependência da fibra de coco. Para esse fim, serão caracterizadas as matérias-primas, testadas várias combinações e será realizado um ensaio de cultivo com alface e couve chinesa. Deste modo, pretende-se determinar em que medida a casca de pinheiro pode substituir a fibra de coco sem comprometer a qualidade agronómica dos substratos, assegurando simultaneamente vantagens ambientais e económicas.

Capítulo II – Apresentação da Empresa

2.1 Lipor

A Lipor é uma entidade portuguesa dedicada à gestão integrada e sustentável de resíduos urbanos, criada em 1982 (Diário da República, 1982). Com sede em Baguim do Monte, no concelho de Gondomar, surgiu de uma cooperação entre vários municípios, como resposta à necessidade de resolver os problemas ambientais associados à deposição inadequada de resíduos na região do Grande Porto. A sua fundação resultou não só das dificuldades da empresa que então geria o antigo aterro, mas também da vontade política de implementar uma solução mais moderna e eficaz.

Atualmente, a Lipor é responsável pela gestão dos resíduos urbanos de oito municípios (LIPOR, 2021): Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo e Vila do Conde (Figura 1). A sua área de intervenção abrange cerca de 646 km² (LIPOR, 2024) e uma população de aproximadamente um milhão de habitantes. Ao longo das últimas décadas, a associação tem consolidado um modelo de gestão baseado na valorização dos resíduos e na promoção de práticas sustentáveis, procurando transformar um problema ambiental num recurso com valor para a sociedade.

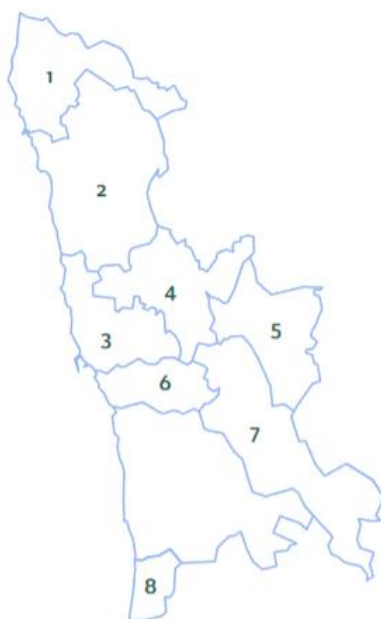


Figura 1 Municípios que integram a Lipor
1 | Póvoa de Varzim; 2 | Vila do Conde; 3 | Matosinhos; 4 | Maia; 5 | Valongo; 6 | Porto; 7 | Gondomar; 8 | Espinho (Fonte: LIPOR, Relatório Integrado 2023, 2024).

O sistema de gestão da Lipor baseia-se em três pilares fundamentais: (1) valorização multimaterial, (2) valorização orgânica e (3) valorização energética, paralelamente, existe um aterro sanitário para os resíduos sem potencial de valorização. Estes pilares são suportados por um conjunto de infraestruturas que incluem: Valorização Orgânica (CVO), uma Central de Valorização Energética (CVE), um Centro de Triagem, 19 Ecocentros e quatro Centros de Recuperação de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos, para além de uma rede de recolha seletiva estruturada por ecopontos, ecocentros e circuitos porta-a-porta.

A valorização multimaterial é realizada no Centro de Triagem, onde se separam e preparam os materiais recolhidos seletivamente para reciclagem. A valorização orgânica decorre na CVO, onde são tratadas anualmente cerca de 60 mil toneladas de resíduos através de compostagem, resultando na produção de um corretivo orgânico certificado, o Nutrimais. Por sua vez, a valorização energética é efetuada na CVE, onde uma parte que é rejeitada dos resíduos é convertida em energia elétrica.

O fluxograma (Figura 2) evidencia ainda outros fluxos de resíduos específicos, como os encaminhados para a produção de recicláveis, a recuperação de sucata ferrosa e a deposição de escórias e cinzas em aterro. Esta representação esquemática mostra a articulação entre recolha seletiva (ecopontos, ecocentros e circuitos especiais) e as diferentes unidades de tratamento, ilustrando a lógica de economia circular promovida pela Lipor.

Além destas atividades, promove a gestão de outros fluxos específicos, como óleos alimentares usados, resíduos de equipamentos elétricos, mobiliário e artigos em segunda-mão e, mais recentemente, resíduos têxteis, através de projetos-piloto de recolha seletiva.

Segundo a Lipor (2023) define como missão “a transformação de resíduos em novos recursos, através da adoção de práticas inovadoras e circulares que permitam gerar e partilhar valor.”

A sua visão orienta-se para a afirmação no mercado global e para a criação de tendências que contribuam para um futuro sustentável. Os valores institucionais que sustentam a sua atividade incluem a ambição, a criatividade, a responsabilidade, a ética e o trabalho em equipa.

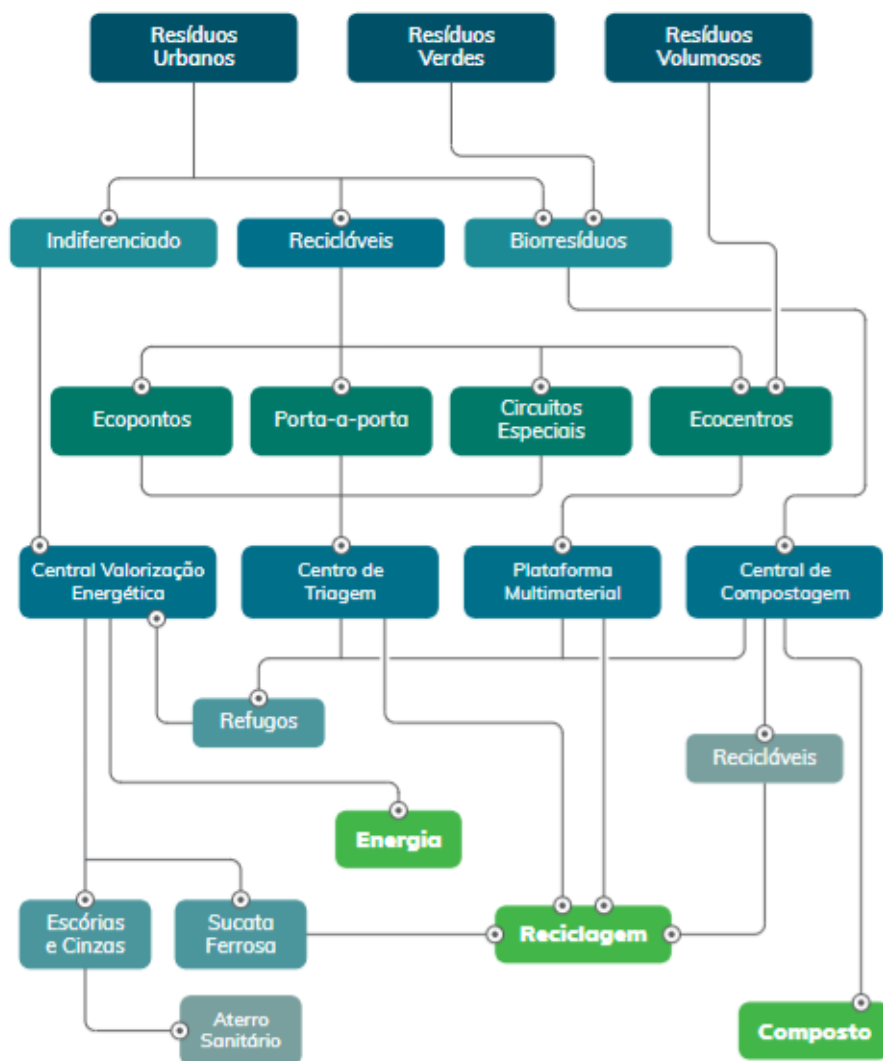


Figura 2 Fluxos de encaminhamento dos resíduos (Fonte: LIPOR, Plano Estratégico da Lipor 2007-2016, Porto, 2007).

2.2 Produtos Lipor

A Lipor assume o compromisso de dar uma nova vida aos resíduos, transformando-os em recursos úteis. Mais do que apenas tratar os resíduos, aposta numa lógica de economia circular, onde o objetivo é reaproveitar, valorizar, reciclar e transformar, criando produtos que acrescentam valor e utilidade

2.2.1 Produtos resultantes da valorização de resíduos

Através dos seus processos de valorização, a Lipor gera diferentes produtos com utilidade prática. Um dos principais exemplos são os materiais recicláveis, provenientes da recolha seletiva de plástico, papel, vidro e metal. Estes resíduos são separados por tipologia e

encaminhados para reciclagem, cumprindo critérios de qualidade estabelecidos por normas técnicas específicas.

Outro resultado relevante é a produção de energia elétrica a partir dos resíduos que não podem ser reciclados ou compostados. Estes são encaminhados para a CVE, onde são incinerados de forma controlada. O calor libertado é aproveitado para a produção de eletricidade. Anualmente, a CVE gera cerca de 170 mil MWh, quantidade suficiente para abastecer aproximadamente 150 mil pessoas, sendo parte desta energia injetada na rede pública (LIPOR, 2024).

Da incineração dos resíduos na CVE resulta ainda o AAGE 32, um agregado reciclado obtido a partir das escórias. Este material é utilizado na construção de estradas como substituto de agregados naturais, apresentando qualidade e resistência semelhantes às dos materiais convencionais (Figura 3).



Figura 3 Escórias na CVE, Fonte autora

A Lipor tem igualmente investido em soluções inovadoras como o WALLIE, um ecoponto doméstico de parede produzido com 89% de plástico reciclado proveniente de mobiliário em fim de vida, como mesas e cadeiras. O seu design plano permite reduzir em 40% (LIPOR, 2024) o volume da embalagem, constituindo uma solução prática e sustentável para a separação de resíduos em contexto doméstico (Figura 4).



Figura 4 Ecoponto doméstico feito com plásticos reciclados de mesas e cadeiras em fim de vida (Fonte: Jornal Novo Regional, 2024).

Por fim, destaca-se o Nutrimais, uma marca desenvolvida a partir da compostagem de biorresíduos. Este produto inclui corretivos agrícolas, substratos orgânicos e vermicomposto, todos certificados para utilização em agricultura biológica e produzidos segundo padrões de qualidade e sustentabilidade. Uma descrição mais detalhada das suas características será apresentada adiante.

2.2.2 Serviços disponibilizados pela Lipor

Além dos produtos resultantes da valorização de resíduos, a Lipor disponibiliza também diversos serviços ligados à educação, à consultoria e à sensibilização ambiental. Um dos exemplos é o Parque Aventura e Trilho Ecológico, criado na área requalificada do antigo aterro de Ermesinde. Este espaço destina-se à prática de atividades ao ar livre, ao contacto com a natureza e à promoção da educação ambiental junto da comunidade.

Outro serviço é o Lipor Internacional, que funciona como consultoria técnica para outros países. Através deste programa, a Lipor partilha a sua experiência na área da gestão de resíduos, apoiando a criação de soluções adaptadas às diferentes realidades locais.

No âmbito do apoio direto a instituições, escolas e empresas, a Lipor disponibiliza o SIAC – Serviço de Intervenção Ambiental Customizado, que presta assistência técnica para melhorar a gestão de resíduos, oferecendo soluções ajustadas às necessidades específicas de cada entidade.

Por fim, a Academia de Formação da Lipor promove cursos e programas destinados ao desenvolvimento de competências em áreas relacionadas com o ambiente e a gestão de resíduos. Através de metodologias modernas e eficazes, esta academia contribui para a capacitação de profissionais e para a disseminação de boas práticas ambientais.

2.3 Gestão de resíduos orgânicos - CVO e o processo de compostagem

A CVO, inaugurada em 2005, trata anualmente cerca de 60 mil toneladas de resíduos biodegradáveis (LIPOR, 2024), nomeadamente restos alimentares e resíduos verdes provenientes da recolha seletiva. Para tal, utiliza um sistema de compostagem em túnel, totalmente automatizado, que permite transformar estes resíduos num corretivo orgânico certificado, o Nutrimais.

O processo tem início na triagem e preparação dos materiais. Os resíduos verdes, como folhas, ramos e troncos resultantes de podas, são verificados visualmente, triturados e, quando necessário, armazenados temporariamente. Em paralelo, são integrados resíduos alimentares provenientes de restaurantes, mercados, habitações e cemitérios, aos quais pode ser adicionada madeira triturada para melhorar a estrutura da mistura.

Seguidamente, todo o material é submetido a uma crivagem inicial, destinada à remoção de metais e à separação de plásticos com dimensões superiores a 150 mm (LIPOR, 2024). Só depois desta etapa os resíduos são encaminhados para os túneis da primeira fase de compostagem, onde permanecem cerca de duas semanas. A Figura 5 ilustra estas etapas iniciais, mostrando (i) os restos alimentares, (ii) os resíduos verdes provenientes da recolha seletiva e (iii) os materiais após a crivagem inicial.



Figura 5 (i) Restos alimentares e (ii) resíduos verdes provenientes da recolha seletiva de biorresíduos, encaminhados para valorização orgânica; (iii) materiais submetidos à crivagem inicial, etapa fundamental do processo de tratamento, que permite a separação de frações indesejáveis e a obtenção de uma granulometria mais homogênea, adequada às fases subsequentes do processo de compostagem (Fonte: autora).

Concluída essa etapa, o material é submetido a um novo tratamento mecânico, através de uma crivagem mais fina de 60 mm, sendo depois encaminhado para os túneis da segunda

fase de compostagem (Figura 6), onde permanece cerca de duas semanas. De seguida, ocorre a fase de afinação, em que o composto é sujeito a uma crivagem final de 10 mm e à separação dos refugos. Após a estabilização, o produto é preparado para comercialização, podendo ser disponibilizado em formato granulado ou pulverulento, sendo posteriormente acondicionado e armazenado conforme necessário.



Figura 6 Túneis de compostagem (Fonte: LIPOR, 2024)

O processo de compostagem é continuamente monitorizado por um sistema informático que controla parâmetros fundamentais como arejamento, temperatura e humidade. Este processo decorre em cinco fases sucessivas: nivelamento e aquecimento, pasteurização (60 °C durante 48 horas), arrefecimento inicial, compostagem a 50 °C durante 8 a 10 dias e, por fim, o arrefecimento final antes da descarga. Ao longo destas etapas são recolhidas amostras para análise de indicadores como teor de matéria orgânica, humidade, pH, condutividade, relação C/N e presença de inertes. O composto estabilizado é então sujeito a ensaios laboratoriais externos para assegurar a sua qualidade. A Figura 7 ilustra o produto final em repouso, pronto para validação laboratorial e posterior embalamento.



Figura 7 Composto finalizado em repouso, aguardando testes laboratoriais e posterior embalagem, Fonte autora

2.4 Substratos Nutrimais

Os substratos Nutrimais foram desenvolvidos para dar resposta às diferentes necessidades de quem cultiva, tanto em contexto profissional como doméstico. O Nutrimais, por si só, é um corretivo orgânico obtido a partir da compostagem de resíduos biodegradáveis. Apesar do seu valor nutritivo, não pode ser usado isoladamente como substrato, pois não apresenta todas as condições necessárias para suportar o crescimento das plantas. Por isso, é misturado com outros materiais para criar um produto mais completo.

Com essa intenção, o departamento de Inovação, Investigação e Desenvolvimento da Lipor deu início, em 2019, a um projeto focado na criação de substratos orgânicos com base no Nutrimais. A ideia surgiu no ano anterior e foi desenvolvida em colaboração com uma empresa especializada, responsável por testar várias combinações de materiais.

Os principais objetivos do estudo consistiram na análise dos microrganismos presentes no Nutrimais, em particular bactérias e fungos benéficos, e no desenvolvimento de diferentes tipos de substrato, tanto de uso geral como adaptados a culturas específicas, nomeadamente hortícolas e aromáticas. Desde o início, a estratégia assentou na valorização do Nutrimais como base para a criação de novos produtos, potenciando um recurso já existente e promovendo práticas mais sustentáveis.

Foram desenvolvidos 22 protótipos, posteriormente testados em ambiente controlado, cujos resultados se revelaram bastante positivos, permitindo avançar para uma fase de produção em maior escala. Como mostra a Figura 8, este processo resultou no lançamento de três tipos

de substrato Nutrimais, ajustados às necessidades de diferentes plantas: Universal, adequado para todo o tipo de culturas; Aromáticas, indicado para sementeiras, transplantes e cultivo de espécies aromáticas; e Hortícolas, desenvolvido especificamente para legumes e hortaliças. Estes substratos asseguram uma nutrição equilibrada, favorecendo um crescimento saudável e contínuo das plantas ao longo do seu ciclo de desenvolvimento.



Figura 8 Substratos Nutrimais

Em 2021, foi aprovada a compra de uma linha de fabrico de substratos, composta por equipamentos para mistura e ensacamento. Como não existia espaço suficiente nas instalações da Lipor para a sua instalação, foi necessário arrendar um novo armazém. Dessa necessidade surgiu o Centro de Experimentação da Lipor (CEL), um espaço onde os projetos desenvolvidos em investigação e desenvolvimento são testados e preparados para serem aplicados em ambiente industrial.

2.4.1 Produtos e matérias-primas

Para a produção das três fórmulas de substratos desenvolvidas, recorreu-se a diferentes matérias-primas, selecionadas em função das suas propriedades físicas e químicas.

A Tabela 1 apresenta a composição das três fórmulas desenvolvidas. O substrato universal combina fibra de coco, turfa loira, perlite e Nutrimais, equilibrando retenção de água, drenagem e matéria orgânica. O substrato para aromáticas inclui fibra de coco, turfa loira, perlite e areia de rio, garantindo boa drenagem e estrutura. Já o substrato para hortícolas associa turfa loira, turfa preta e Nutrimais, proporcionando maior fertilidade e retenção hídrica, adequadas ao cultivo de legumes e hortaliças.

Tabela 1 Lista de matérias-primas

Substrato	Matérias-Primas
Universal	Fibra de coco, Turfa loira, Perlite, Nutrimais
Aromáticas	Fibra de coco, Turfa loira, Perlite, Areia
Hortícolas	Turfa loira, Turfa preta, Nutrimais

Capítulo III – Revisão Bibliográfica

3.1 Conceito e evolução do cultivo sem solo

O cultivo sem solo (CSS) surgiu como alternativa à agricultura convencional, em resposta ao aumento da população mundial, à escassez de solos férteis e à necessidade de produção em ambientes urbanos. Estes sistemas permitem maior eficiência no uso da água e dos nutrientes, além de reduzirem problemas de pragas e doenças associados ao solo (Olympios & Choukr-Allah, 1999; El-Kazzaz & El-Kazzaz, 2017).

Distinguem-se três modalidades principais de CSS: (i) hidroponia, em que as raízes das plantas se desenvolvem em soluções nutritivas; (ii) aeroponia, em que os nutrientes são fornecidos através de névoa; e (iii) cultivo com substratos, que utiliza materiais sólidos para oferecer suporte físico, retenção de água e disponibilização de nutrientes (Schwarz, 2012; Almeida & Reis, 2017).

Nas últimas décadas, o cultivo com substratos ganhou grande relevância comercial, permitindo a produção de hortícolas e pequenos frutos em contextos de solos degradados ou limitados para a agricultura. A sua expansão tem impulsionado a procura por alternativas mais sustentáveis aos materiais convencionais, integrando considerações económicas e ambientais na escolha das matérias-primas (Van Os et al., 2008; da Cruz et al., 2022).

3.2 Benefícios e limitações dos sistemas sem solo

Os sistemas de CSS oferecem vantagens significativas em relação à agricultura convencional. Entre as mais importantes está a eficiência no uso da água: a recirculação da solução nutritiva reduz perdas por drenagem profunda e evaporação, permitindo alcançar maior produtividade por unidade de área (Almeida & Reis, 2017; El-Kazzaz & El-Kazzaz, 2017). Essa perspectiva não se restringe apenas a esses estudos, sendo amplamente discutida na literatura sobre sistemas de cultivo sem solo. Além disso, a possibilidade de fornecer nutrientes de forma controlada e ajustada às fases de desenvolvimento da planta traduz-se em maior uniformidade e rapidez de crescimento.

Um benefício adicional é a menor incidência de doenças e pragas típicas do solo. Ao eliminar o contacto direto com patógenos, reduz-se a necessidade de pesticidas, promovendo sistemas mais limpos e sustentáveis (Chambers et al., 2011). A independência face à fertilidade natural do solo abre ainda a porta à instalação de estufas e unidades produtivas em locais tradicionalmente impróprios para a agricultura, incluindo zonas urbanas ou áreas com solos degradados.

Apesar destes aspetos positivos, a adoção dos sistemas sem solo envolve constrangimentos

relevantes. O investimento inicial é elevado: estruturas, sistemas de irrigação, sensores e equipamentos de monitorização representam custos significativos. Acresce a necessidade de mão de obra especializada, já que falhas no fornecimento de água, no controlo do pH ou da CE podem comprometer rapidamente a produção (Olympios & Choukr-Allah, 1999; Hernández et al., 2023).

Assim, os diferentes tipos de CSS apresentam um equilíbrio variável entre potencial produtivo e exigências técnicas. Entre eles, o cultivo com substratos destaca-se pela relativa simplicidade de implementação e pela versatilidade na escolha dos materiais, o que explica a sua ampla difusão e justifica uma análise mais aprofundada no tópico seguinte.

3.3 Cultivo com substratos

O uso de substratos no CSS combina a eficiência da hidroponia com a estabilidade física de um suporte sólido. Esta modalidade baseia-se em materiais que garantem simultaneamente sustentação mecânica às plantas, retenção de água e disponibilização de nutrientes (Martínez & Roca, 2011; Papadopoulos et al., 2008).

Os substratos podem ser de origem orgânica, como turfa, fibra de coco, casca de arroz ou casca de pinheiro, e de origem inorgânica, como perlite, vermiculite, areia ou lã de rocha. Cada material apresenta vantagens e limitações específicas, pelo que a escolha depende do equilíbrio entre propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como de fatores económicos e ambientais (Barrett et al., 2016).

Nas últimas décadas, a produção em substratos tornou-se prática consolidada em culturas de elevado valor comercial, nomeadamente hortícolas e ornamentais, por permitir maior controlo das condições de cultivo e menor exposição a problemas associados ao solo (Di Lorenzo et al., 2013). Esta tendência impulsionou também a procura por matérias-primas alternativas, capazes de substituir os componentes mais utilizados e, em muitos casos, importados, reforçando a importância da avaliação das suas características específicas.

3.4 Propriedades físicos dos substratos

A eficácia dos substratos utilizados nos CSS depende fundamentalmente das suas propriedades físicas, que afetam diretamente o ambiente radicular. Entre as propriedades mais relevantes destacam-se a granulometria, a porosidade total e ocupada por ar, a densidade aparente (Dap), a retenção de água e a compactação. Tais parâmetros influenciam a absorção de nutrientes, a respiração das raízes e o desenvolvimento vegetal em geral (Gruda & Schnitzler, 2004a).

3.4.1 Granulometria

A granulometria corresponde à distribuição do tamanho das partículas e determina a proporção de micro e macroporos. Partículas maiores favorecem o arejamento, enquanto as mais finas aumentam a retenção de água. Segundo Reis (2009), a granulometria ideal situa-se entre 0,25 e 2,25 mm, proporcionando equilíbrio entre retenção hídrica e oxigenação. Estudos clássicos, como os de Handreck (1983), mostraram que diferentes frações da casca de pinheiro originam variações significativas no equilíbrio entre ar e água (Figura 9). Assim, combinações de partículas médias e grossas tendem a gerar substratos mais estáveis e com melhor desempenho.

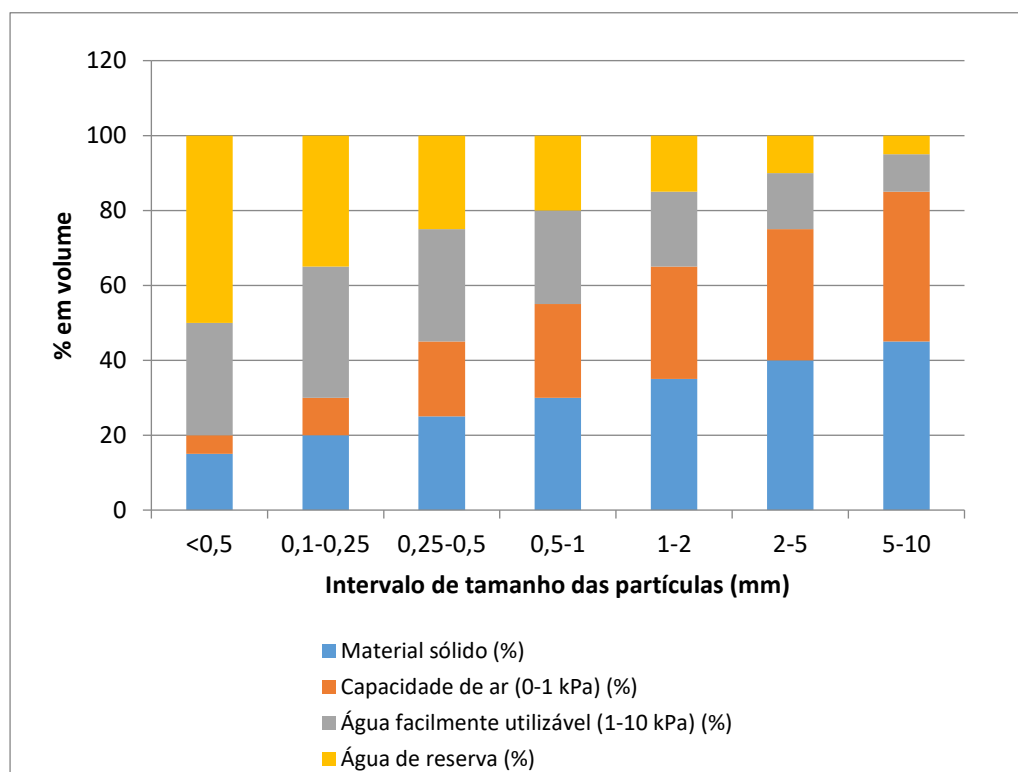


Figura 9 Características físicas de substratos constituídos com partículas de granulometria determinada, obtida da trituração de casca de pinheiro (*Pinus radiata*) (fonte; Handreck, 1983)

3.4.2 Porosidade total e capacidade de arejamento

A porosidade total corresponde ao volume do substrato ocupado por água e ar, sendo habitualmente expressa em percentagem. Valores superiores a 85% são geralmente considerados adequados (De Boodt & Verdonck, 1972). Contudo, mais relevante do que o valor global é a repartição entre macroporos e microporos.

A fração de macroporos, que permanece preenchida por ar após a drenagem, define a capacidade de arejamento. Este parâmetro é essencial para a respiração radicular e para a atividade microbiana. Valores abaixo de 10% comprometem a oxigenação, conduzindo à acumulação de dióxido de carbono e à produção de etileno, com impacto negativo no crescimento das plantas. O intervalo considerado ótimo situa-se entre 20–30% do volume do substrato (De Boodt & Verdonck, 1972; Reis, 2005).

Comparações entre diferentes matérias-primas revelam contrastes acentuados: enquanto turfas mais decompostas apresentam valores de arejamento baixos, muitas vezes abaixo do limite recomendado, a perlite destaca-se pela sua elevada contribuição para este parâmetro. A casca de pinheiro, dependendo da granulometria e do estado de compostagem, pode atingir níveis de porosidade adequados, sobretudo quando usada em combinação com outros materiais estruturantes (Ribeiro et al., 2001; Maher et al., 2007).

A Tabela 3 sintetiza os intervalos de referência propostos por De Boodt e Verdonck (1972) e os valores obtidos em diferentes materiais. Estes dados permitem avaliar a adequação de cada substrato em termos de espaço poroso total, capacidade de arejamento e água facilmente disponível.

Tabela 2 Valores de referência propostos por De Boodt e Verdonck (1972) e valores obtidos em diferentes materiais utilizados como substratos de cultivo.

Material	EPT (>85)	CA (20-30)	AFU (20-30)	AR (4-10)	Dr	Dap
Recomendado	>85	20-30	20-30	4-10	-	-
Turfa loira	88	15	30	9	1,45	0,177
Turfa negra	86	14	16	7	1,45	0,203
Perlite	95	56	13	5	2,3	0,707

**Alguns valores encontram-se arredondados à unidade. EPT – espaço poroso total; CA – capacidade de arejamento; AFU – água facilmente utilizável; AR – água de reserva; Dr – densidade real; Dap – densidade aparente.*

3.4.4 Retenção de água

A retenção de água é um dos parâmetros mais importantes para a definição da qualidade de um substrato. Está diretamente relacionada com a granulometria e a porosidade, podendo ser descrita em frações: água facilmente disponível, que pode ser absorvida sem esforço pelas plantas; água de reserva, utilizada em situações de maior exigência; e água dificilmente disponível, retida com demasiada intensidade nos microporos. Reis (2005) destaca que a

soma da água facilmente disponível e da água de reserva define a água efetivamente acessível para o crescimento vegetal.

Valores de referência indicam que a água facilmente disponível deve situar-se entre 20–30% e a água de reserva entre 4–10% do volume total do substrato (Abad et al., 2004). Substratos com predominância de partículas finas tendem a reter grandes quantidades de água, mas muitas vezes indisponíveis para as plantas, enquanto materiais como perlite e casca de pinheiro aumentam a drenagem e favorecem um equilíbrio mais funcional.

3.4.5 Densidade aparente

A Dap de um substrato corresponde à relação entre a massa seca do material e o volume que ocupa, incluindo os espaços porosos. Este parâmetro é fundamental porque influencia de forma direta a porosidade, a retenção de água, o arejamento e até a fixação mecânica das plantas.

Valores baixos de Dap ($<0,4 \text{ g/cm}^3$) são geralmente considerados ótimos para a produção hortícola em vaso ou estufa, já que permitem um substrato leve, fácil de transportar e manusear, enquanto favorecem a retenção de água e o desenvolvimento radicular (Wallach, 2008; Abad et al., 2001). Turfas fibrosas, por exemplo, apresentam densidades muito baixas e contribuem para misturas mais leves, enquanto materiais minerais como a areia ou a perlite, dependendo da granulometria, podem aumentar a densidade da mistura.

Contudo, valores demasiado reduzidos também têm desvantagens. Substratos muito leves podem comprometer a estabilidade das plantas de maior porte, sobretudo em cultivos ao ar livre, sujeitos à ação do vento e da chuva. Por isso, em sistemas protegidos recomenda-se Dap próxima de $0,15\text{--}0,30 \text{ g/cm}^3$, enquanto em campo aberto valores mais elevados, entre $0,50\text{--}0,75 \text{ g/cm}^3$, asseguram maior firmeza (Mejías & Ruano, 1990; López, 2005).

Por outro lado, densidades altas reduzem o espaço poroso e aumentam a resistência mecânica à penetração das raízes. Nestes casos, a água tende a ser retida em microporos de difícil acesso, diminuindo a fração de água útil e reduzindo a oxigenação (Gruda & Schnitzler, 2004). A casca de pinheiro, por exemplo, apresenta densidade variável entre 130 e 450 g/L consoante a granulometria e o grau de compostagem, podendo gerar misturas mais leves ou mais compactas (Brito & Mourão, 2012; Reis, 2005).

A Dap não depende apenas da natureza do material, mas também do estado de decomposição e da forma das partículas. Substratos ricos em fibras longas tendem a formar estruturas mais soltas, enquanto materiais fragmentados e envelhecidos aumentam a compactação ao longo do tempo. Como refere Reis (2005), o manuseamento, o armazenamento e os ciclos de rega podem alterar significativamente a Dap, sendo essencial avaliar este parâmetro não apenas no início do cultivo mas também durante o uso prolongado.

Finalmente, a Dap tem impacto logístico e económico. Misturas mais leves reduzem custos de transporte e facilitam o enchimento de vasos em escala industrial, mas podem exigir substituições mais frequentes devido à sua instabilidade estrutural. Em contrapartida, substratos mais pesados oferecem maior durabilidade, mas implicam maiores gastos energéticos no transporte e manuseamento. Este equilíbrio deve ser considerado quando se avaliam alternativas locais, como a casca de pinheiro, em comparação com matérias-primas importadas como a fibra de coco ou a turfa.

3.4.6 Compactação

A compactação resulta da pressão durante o enchimento dos recipientes, do impacto da rega e da degradação das partículas orgânicas ao longo do tempo. Uma ligeira compactação pode aumentar a quantidade de água disponível, mas níveis elevados reduzem drasticamente o arejamento e a atividade microbiana (Ribeiro et al., 2001). Reis (2005) reforça que este fator deve ser monitorizado em substratos ricos em componentes orgânicos, como a casca de pinheiro, pois a decomposição progressiva pode alterar a estrutura física inicial.

3.5 Propriedades químicas dos substratos

As propriedades químicas dos substratos influenciam de forma decisiva a disponibilidade de nutrientes, a estabilidade do sistema radicular e a saúde das plantas. Ao contrário do solo agrícola, que apresenta elevada capacidade tampão, os substratos têm geralmente reservas limitadas de nutrientes, exigindo maior controlo e monitorização (Reis, 2005). Os parâmetros de maior relevância são a matéria orgânica, o pH, a capacidade de troca catiónica (CTC), a condutividade elétrica (CE) e a disponibilidade de nutrientes.

3.5.1 Matéria orgânica

A matéria orgânica (MO) é um dos componentes mais importantes dos substratos. Para além de fornecer nutrientes essenciais, atua como condicionador físico-químico, aumentando a capacidade de retenção de água, a CTC e a estabilidade estrutural. A decomposição da MO dá origem a substâncias húmicas, que melhoram a fertilidade e regulam o pH do meio (Bot & Benites, 2005).

Reis (2005) salienta que a natureza da matéria orgânica é tão importante quanto a sua quantidade: materiais instáveis, como casca de pinheiro fresca, apresentam relação C/N elevada e podem imobilizar azoto, reduzindo a disponibilidade imediata para as plantas. Já compostos estabilizados, como o Nutrimais, apresentam menor relação C/N e libertação gradual de nutrientes, favorecendo a nutrição equilibrada.

3.5.2 pH

O pH regula a solubilidade dos nutrientes e condiciona a atividade microbiana no substrato. Valores ótimos situam-se entre 5,3 e 6,5, faixa em que a maioria dos elementos essenciais se encontra biodisponível (Abad et al., 2004). Desvios acentuados podem provocar problemas graves: substratos ácidos aumentam a disponibilidade de manganês e ferro, podendo atingir níveis tóxicos, enquanto pH alcalino reduz a absorção de fósforo, ferro e zinco (Santos, 2012). Na prática, o pH inicial depende fortemente da matéria-prima. A fibra de coco apresenta valores próximos da neutralidade, enquanto turfas tendem a ser ácidas (pH 3–4) e necessitam de correção com calcário. A casca de pinheiro, por sua vez, apresenta pH ligeiramente ácido na forma fresca, mas pode tornar-se neutra após compostagem (Maher et al., 2007; Reis, 2005).

3.5.3 CTC

A CTC reflete a aptidão do substrato para armazenar e disponibilizar cátions como K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e NH_4^+ . Substratos com elevada CTC, como turfas e compostos, oferecem maior efeito tampão e estabilidade nutricional (Raviv et al., 2002; Abad et al., 2004). Já materiais inorgânicos como perlite ou lã de rocha apresentam valores muito baixos, exigindo fertirrigação contínua (Maher et al., 2007). A casca de pinheiro compostada pode atingir valores próximos de 55 meq/100 g, considerados adequados para cultivos intensivos (Abad et al., 2004; Reis, 2005).

3.5.4 CE e Salinidade

A CE é um indicador da concentração de sais solúveis. Níveis excessivos reduzem o potencial hídrico e a absorção de água, provocando sintomas de salinidade (Ribeiro, 1996). O intervalo adequado situa-se geralmente entre 0,75 e 2 dS/m (Abad et al., 2004). Certas matérias-primas apresentam riscos particulares: fibras de coco mal lavadas podem acumular sódio e cloro (Evans et al., 1996), enquanto compostos pouco estabilizados podem concentrar sais. A qualidade da água de irrigação tem papel determinante, podendo agravar ou atenuar o problema (Reis, 2005).

3.5.5 Disponibilidade de nutrientes

A disponibilidade de nutrientes depende da interação entre pH, CTC e teor de matéria orgânica. Substratos orgânicos apresentam maior variabilidade: a fibra de coco é rica em potássio, mas pobre em cálcio; a turfa fornece baixos níveis de nutrientes disponíveis, exigindo adubação complementar; já a casca de pinheiro contém manganês e ferro em níveis

relevantes, mas baixos teores globais de azoto e fósforo (Maher et al., 2007; Reis, 2005; Brust, 2019).

A Tabela 4 sintetiza os intervalos de referência para os principais parâmetros químicos em substratos hortícolas (Abad et al., 2004), incluindo pH, CE, CTC e disponibilidade de nutrientes.

Tabela 3 Valores ótimos para propriedades químicas de substratos (adaptado de Abad et al., 2004).

Variável	Valor ótimo
CE (dS m⁻¹)	0,75 a 2
pH	5,2 a 6,3
Relação C/N	20 a 40
Matéria orgânica total (% p/p)	> 80
Azoto nítrico (mg kg⁻¹)	100 a 200
Azoto amoniacal (mg kg⁻¹)	0 a 20
Potássio (K) (mg kg⁻¹)	150 a 250
Fósforo (P) (mg kg⁻¹)	6 a 10
Magnésio (Mg) (mg kg⁻¹)	> 70
Cálcio (Ca) (mg kg⁻¹)	> 200
Ferro (Fe) (mg kg⁻¹)	0,3 a 3
Manganês (Mn) (mg kg⁻¹)	0,02 a 3
Molibdénio (Mo) (mg kg⁻¹)	0,01 a 0,1
Zinco (Zn) (mg kg⁻¹)	0,3 a 3
Cobre (Cu) (mg kg⁻¹)	0,001 a 0,5
Boro (B) (mg kg⁻¹)	0,05 a 0,5

3.6 Substrato adequado

O substrato adequado resulta do equilíbrio entre diferentes dimensões: físicas, químicas, biológicas, económicas e ambientais, que em conjunto garantem suporte às plantas e

sustentabilidade ao sistema de cultivo (Reis, 2005; Abad et al., 2004; Raviv et al., 2002). A Figura 10 sintetiza estes critérios.

No plano físico, destacam-se a porosidade total elevada, a capacidade de arejamento entre 20–30% e uma fração de água facilmente disponível próxima de 20–30% do volume. A Dap deve ser baixa para facilitar o manuseamento, mas sem comprometer a estabilidade das plantas (De Boodt & Verdonck, 1972; Reis, 2005).

Quimicamente, os parâmetros mais relevantes são o pH (ótimo entre 5,3 e 6,5), a CE (<2 dS/m) e a capacidade de troca catiónica, que assegura reserva e disponibilização de nutrientes (Abad et al., 2004; Raviv et al., 2002).

Em termos biológicos, importa que o substrato esteja livre de sementes, patogénios e compostos fitotóxicos, assegurando ao mesmo tempo alguma atividade microbiana benéfica (Maher et al., 2007).

Por fim, os aspetos económicos e ambientais incluem a disponibilidade local, os custos de transporte e a pegada ecológica, fatores cada vez mais determinantes na seleção de matérias-primas (Gruda, 2019; Barrett et al., 2016). Assim, o “substrato ideal” não é um material único, mas uma formulação que integra estas dimensões, ajustada às necessidades das culturas e às condições de produção.

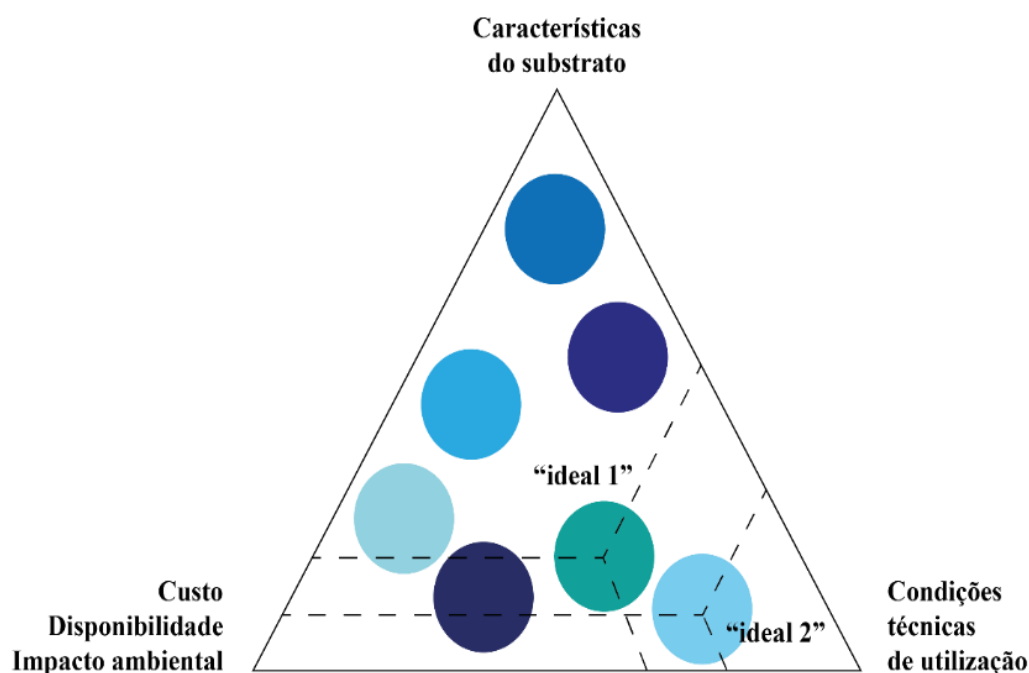


Figura 10 Escolha de um substrato. Adaptado de Manual de cultivo sem solo: Aspetos teóricos e práticos dos cultivos hidropónicos (p. 135), de M. Louro & M. Reis, 2004, Lisboa: Quântica Editora

3.6.1 Matérias-primas utilizadas nos substratos

3.6.1.1 Fibra de coco

A fibra de coco, proveniente do mesocarpo do fruto de *Cocos nucifera*, é atualmente um dos substratos mais utilizados em horticultura intensiva, sobretudo em sistemas de estufa. O material é constituído por fibras longas e pó (coir dust), cuja proporção influencia de forma direta as propriedades físicas do substrato (Abad et al., 2002; Maher et al., 2007).

Do ponto de vista físico, apresenta baixa Dap e elevada porosidade total, combinando boa retenção de água com adequada capacidade de arejamento. Estas características explicam a sua ampla difusão em culturas de elevado valor comercial, como tomate, pimento e pequenos frutos (Raviv et al., 2002; Reis, 2005). A granulometria desempenha papel central, pois frações mais finas retêm maior volume de água, mas reduzem o arejamento, ao passo que partículas mais grossas favorecem a oxigenação radicular.

Quimicamente, a fibra de coco distingue-se pelo elevado teor de potássio e sódio, associado a baixos níveis de cálcio e azoto, o que pode originar desequilíbrios nutricionais. Em muitos casos apresenta também CE elevada, sobretudo quando não é previamente lavada, exigindo lixiviações antes da utilização (Evans et al., 1996; Abad et al., 2004).

A Tabela 5 apresenta intervalos de referência para as propriedades físico-químicas da fibra de coco, evidenciando as suas vantagens e limitações em comparação com outros materiais amplamente utilizados em substratos hortícolas.

Tabela 4 Comparação entre valores bibliográficos e dados do fornecedor da Lipor para fibra de coco

Características	Bibliografia (Soria & Olivert, 2002; Evans et al., 1996; Espert, 2004)	Fornecedor da Lipor – Fibra de coco (Lote 0–8 mm, 2021)
Inércia química	Não	Não indicado
pH	5,5 – 6,2	6,1
CE (dS/m)	0,7 – 3,5	1,2
CTC (meq/100g)	31 – 150	Não indicado
Poder tampão	Baixo	Não indicado
Sódio (mg/L)	36 – 950	85
Cloro (mg/L)	537 – 1450	170
Sulfatos (mg/L)	350	12
Magnésio (mg/L)	3,1	3,8
Potássio (mg/L)	436	312
Fósforo (mg/L)	—	8

Fonte: Soria & Olivert (2002); Evans et al. (1996); Espert (2004); Dados do fornecedor (Fibra de Coco Bloco 0–8 mm, 2021).

3.6.1.2 Turfa

A turfa é, historicamente, o substrato mais utilizado em horticultura e floricultura, representando a base de muitas formulações comerciais. Forma-se pela decomposição parcial de resíduos vegetais em condições de baixa oxigenação, originando materiais com diferentes graus de humificação (Raviv & Leith, 2008). Distinguem-se essencialmente a turfa loira, mais fibrosa e ácida, e a turfa negra, mais decomposta e com maior densidade (Abad et al., 2004).

Fisicamente, a turfa apresenta baixa Dap e elevada porosidade total, assegurando boa capacidade de retenção de água. Contudo, turfas muito decompostas tendem a reduzir a fração de ar após a drenagem, limitando a oxigenação radicular (Reis, 2005).

Quimicamente, caracteriza-se por pH ácido (3,0–4,5), baixa CE e reduzida disponibilidade de nutrientes, exigindo correção do pH com calcário e suplementação mineral (Lemaire, 1995; Maher et al., 2007). Por outro lado, apresenta elevada capacidade de troca catiónica, atuando como reservatório de nutrientes e conferindo estabilidade ao sistema de cultivo (Abad et al., 2004).

A Tabela 6 resume as principais propriedades físico-químicas da turfa, destacando o seu papel como padrão de referência na formulação de substratos, apesar das limitações associadas à acidez e à baixa fertilidade inicial.

Tabela 5 Comparação entre valores bibliográficos de diferentes tipos de turfa (Abad, 2004) e dados do fornecedor Floragard (2021).

Propriedades físicas	Sphagnum loira (Abad, 2004)	Sphagnum negra (Abad, 2004)	Herbácea negra (Abad, 2004)	Turfa loira – Floragard (2021)
Dap (g/cm ³)	0,07	0,14	0,08	~0,30
Porosidade total (% v/v)	96	91	94	Não indicado
Água facilmente assimilável (% v/v)	25	28	18	Não indicado
Água dificilmente disponível (% v/v)	24	38	53	Não indicado
Água de reserva (% v/v)	6	7	8	Não indicado
Água total disponível (% v/v)	31	35	26	Não indicado
Capacidade de arejamento (% v/v)	41	18	15	Não indicado

pH (CaCl₂)	~3,3*	~3,9*	~6,3	5,8
Salinidade (g/l)	—	—	—	0,3
Nutrientes adicionados	—	—	—	Mistura de microelementos

*Valores típicos de turfas Sphagnum segundo literatura, não especificados na tabela de Abad (2004).

3.6.1.3 Perlite

A perlite é um material de origem vulcânica, obtido pelo aquecimento rápido da rocha até cerca de 1000 °C, processo que provoca a expansão das partículas e origina uma estrutura porosa e leve (Abad et al., 2004). É amplamente utilizada como componente inorgânico em substratos hortícolas.

Fisicamente, caracteriza-se pela baixa Dap, elevada porosidade total e excelente capacidade de arejamento, o que a torna útil para corrigir misturas excessivamente retentoras de água, como turfa ou fibra de coco (Reis, 2005; Raviv et al., 2002). Contudo, a sua capacidade de retenção hídrica é limitada, podendo levar a secagem rápida quando usada isoladamente.

Quimicamente, a perlite é praticamente inerte, apresentando pH próximo da neutralidade, baixa CE e CTC muito reduzida. Por esta razão, não fornece nutrientes às plantas, exigindo fertirrigação contínua e equilibrada (Maher et al., 2007).

A Tabela 7 apresenta os principais valores físico-químicos da perlite, confirmando o seu papel como corretivo de arejamento e estabilidade estrutural, mas também a sua limitação nutricional.

Tabela 6 Comparação entre valores bibliográficos de perlite (Abad, 1995) e dados fornecidos pela Perlindustria (Perlite V12).

Propriedade	Valores	
	bibliográficos (Abad, 1995)	Fornecedor – Perlite V12 (Perlindustria)
Granulometria	A13 (fina), B12, B10, B9, B6	1–3 mm (média)
Dap	0,053 – 0,143 g/cm ³	45–100 kg/m ³ (aparente) / 45–150 kg/m ³ (compactada)
Porosidade total (% v/v)	85 – 97	Não especificado
Capacidade de arejamento (% v/v)	18 – 58	Indicada como principal função (arejamento)

Água facilmente assimilável (% v/v)	6,9 – 38	Não especificado
pH	Não indicado	7 – 10
Composição química	Não detalhada	SiO ₂ (70–80%), Al ₂ O ₃ (12–16%), Na ₂ O (2–5%), K ₂ O (2–5%), CaO (0–2%), MgO (0–1%), Fe ₂ O ₃ (0–1%), H ₂ O <1%

3.6.1.4 Casca de pinheiro

A casca de pinheiro é um subproduto abundante da indústria florestal, representando entre 8 e 15% da biomassa total da árvore. Em Portugal, onde o género *Pinus* ocupa grande área florestal, constitui uma matéria-prima disponível e de baixo custo, com crescente interesse como componente de substratos hortícolas (Reis, 2005; Maher et al., 2007).

As propriedades físicas da casca de pinheiro estão fortemente relacionadas com a granulometria. Frações mais grossas favorecem a drenagem e o arejamento radicular, mas retêm menos água; frações finas aumentam a capacidade hídrica, embora reduzam a proporção de ar após a drenagem (Handreck, 1983; Reis, 2009). A Tabela 2 apresenta o efeito da granulometria em diferentes classes de partículas de *Pinus radiata*, confirmando esta relação. A Tabela 3, com valores de referência de porosidade e capacidade de arejamento, demonstra que a casca pode alcançar intervalos adequados quando calibrada. Finalmente, a Tabela 8 sintetiza propriedades físicas de diferentes frações de casca de pinheiro, reforçando a importância da seleção do tamanho de partículas para ajustar o equilíbrio entre retenção de água e oxigenação (Abad et al., 2004; Miner, 1994; Reis et al., 2005).

Tabela 7 Propriedades físicas de casca de pinheiro adaptado do Manual de cultivo sem solos (1 Abad et al., 2004; 2 Miner, 1994; 3 Reis et al., 2005).

Propriedades físicas	1	2	3 Não compostada	3 Compostada
Dap	0,19	0,286	0,156	0,157
Porosidade total (% v/v)			89,7	89,7
Água facilmente assimilável (% v/v)	80,6	82,6	30,0	8,2
Água dificilmente disponível (% v/v)			14,6	
Água de reserva (% v/v)	12,7	18,7	1,5	22,2
Água total disponível (% v/v)	36,9	30,4	46,1	31,9

Capacidade de arejamento (% v/v)	2,6	3,35	43,7	57,9
Água utilizável (% v/v)	15,3	22,05	31,5	9,7

Do ponto de vista químico, a casca apresenta pH naturalmente ácido, geralmente entre 4,5 e 5,5, compatível com a maioria das culturas hortícolas (Abad et al., 2004). O teor inicial de nutrientes disponíveis é baixo, com exceção do manganês e do ferro, que podem ocorrer em níveis relativamente elevados (Maher et al., 2007; Reis, 2005). A relação C/N elevada em casca fresca pode provocar imobilização de azoto, o que torna a compostagem indispensável. Este processo estabiliza a matéria orgânica, reduz compostos fenólicos e aumenta a capacidade de troca catiónica, que pode atingir valores superiores a 50 meq/100 g, comparáveis aos da turfa (Reis, 2005; Abad et al., 2004). A Tabela 4 resume os intervalos de referência para os principais parâmetros químicos.

Entre as vantagens do uso da casca de pinheiro destacam-se a abundância regional, a valorização de um subproduto florestal e as boas propriedades físicas, que a tornam competitiva na produção em vaso e em estufa. As limitações relacionam-se com a variabilidade entre lotes, a presença de compostos fenólicos em casca não estabilizada e a necessidade de compostagem para assegurar estabilidade e uniformidade (Ribeiro et al., 2001; Reis, 2005).

3.6.1.5 Nutrimais

O Nutrimais é um composto orgânico obtido a partir da valorização de resíduos agroindustriais e verdes, sujeitos a um processo controlado de compostagem. Trata-se de um produto comercial amplamente utilizado em Portugal, certificado como corretivo orgânico de solos e enquadrado pelo Decreto-Lei n.º 103/2015, que regula a colocação no mercado de fertilizantes e substratos (Reis et al., 2005; Brito & Mourão, 2012).

Fisicamente, apresenta Dap superior à de materiais como turfa ou fibra de coco, podendo limitar a sua aplicação isolada. Contudo, quando incorporado em misturas, melhora a estabilidade estrutural do substrato e reduz fenómenos de compactação. A porosidade total situa-se dentro de valores aceitáveis, embora a retenção de água e o arejamento variem consoante a granulometria e o grau de maturação do composto.

Do ponto de vista químico, o Nutrimais distingue-se pelo elevado teor de matéria orgânica estabilizada, que contribui para aumentar a CTC e fornece nutrientes essenciais ao crescimento vegetal. Apresenta ainda pH próximo da neutralidade e CE moderada, parâmetros que se enquadram nos intervalos de referência para substratos hortícolas (Abad et al., 2004). A Tabela 9 resume alguns dos principais valores físico-químicos do produto,

tanto na formulação habitual como na formulação desidratada, esta última caracterizada por menor teor de humidade, matéria orgânica e fósforo, mas com valores mais concentrados de carbono e azoto totais.

As principais vantagens da sua utilização residem na valorização de resíduos, na redução da dependência de matérias-primas importadas e no fornecimento adicional de nutrientes ao sistema de cultivo. Entre as limitações encontram-se a variabilidade entre lotes e a densidade relativamente elevada, aspetos que justificam a sua aplicação sobretudo em mistura com materiais mais leves, como turfa, fibra de coco ou casca de pinheiro (Reis et al., 2005).

Tabela 8 Principais características do Nutrimais (valores indicados pelo Lipor).

Parâmetro	Formulação habitual	Formulação desidratada
Humidade	< 28%	10,5%
Matéria orgânica	> 59%	52,5%
pH (H₂O)	< 9,2	8,68
CE	< 2,7 mS/cm	—
Relação C/N	< 13	—
P₂O₅ / Fósforo (P)	> 1,4%	0,65%
K₂O / Potássio (K)	> 1,8%	1,50%
MgO	0,47%	—
Carbono total	—	29,2%
Azoto total	—	2,41%

3.6.2 Propriedades económicas dos substratos

A viabilidade de um substrato depende não apenas das suas propriedades físicas e químicas, mas também do seu custo. Este resulta da disponibilidade local da matéria-prima, dos processos de extração ou transformação, do transporte e armazenamento, bem como da durabilidade ao longo de vários ciclos de cultivo (Gruda, 2019).

A turfa, tradicionalmente considerada o padrão de referência, envolve custos crescentes devido à exploração limitada das turfeiras e às restrições ambientais associadas (Abad et al., 2004). A fibra de coco apresenta preços competitivos nos países produtores, mas em regiões

como a Europa o valor final é condicionado pelos custos de importação e pela logística (Reis, 2009).

A casca de pinheiro destaca-se pela abundância e baixo custo em regiões com forte indústria florestal. Em Portugal, constitui um subproduto disponível no mercado nacional e competitivo face a materiais importados. Ainda assim, os custos podem variar em função da necessidade de compostagem e da calibração granulométrica para assegurar qualidade uniforme (Reis et al., 2005).

No caso da perlite e de outros corretivos minerais, o preço é influenciado pelos processos industriais de expansão térmica e pelo transporte a partir das zonas de origem. Por isso, são frequentemente aplicados em percentagens reduzidas, de modo a corrigir propriedades físicas sem encarecer demasiado a mistura (Maher et al., 2007).

Estes aspetos económicos não podem, contudo, ser analisados isoladamente, uma vez que estão intimamente ligados às implicações ambientais decorrentes da produção e utilização dos substratos, abordadas no ponto seguinte.

3.6.3 Propriedade ambientais dos substratos

3.6.3.1 Pegada de carbono e avaliação do ciclo de vida (ACV)

A análise das propriedades ambientais dos substratos ganhou particular relevância no contexto atual, em que a sustentabilidade passou a ser critério determinante para a seleção de matérias-primas. A ACV, definida pelas normas ISO 14040/44, é a metodologia de referência para quantificar os impactos ambientais de um produto desde a sua origem até ao fim do seu uso, permitindo medir a pegada de carbono associada às diferentes fases de produção, transporte, utilização e destino final (Bustamante et al., 2016; Gruda, 2019).

A turfa continua a ser um dos substratos mais utilizados, mas a sua exploração apresenta sérios impactos ambientais. As turfeiras são ecossistemas acumuladores de carbono, e a sua extração liberta grandes quantidades de CO₂, contribuindo para o aquecimento global. Além disso, estas zonas húmidas têm elevada biodiversidade e desempenham funções ecológicas críticas, o que reforça as restrições crescentes ao seu uso (Abad et al., 2004; Prasad & Maher, 2019).

A fibra de coco é frequentemente considerada uma alternativa mais sustentável, uma vez que resulta do aproveitamento de um subproduto agrícola abundante. Nos países produtores, como Índia, Sri Lanka ou Indonésia, a sua utilização contribui para valorizar resíduos agroindustriais. Contudo, em regiões importadoras, como a Europa, o transporte intercontinental tem um peso significativo na sua pegada de carbono. Acresce ainda o impacto associado às lavagens necessárias para reduzir o teor de sais, que implicam consumo elevado de água e energia (Evans et al., 1996; Gruda, 2019). Assim, embora tecnicamente

eficiente, a sustentabilidade da fibra de coco varia fortemente em função do contexto geográfico.

A casca de pinheiro apresenta vantagens ambientais evidentes em países com forte setor florestal, como Portugal. Trata-se de um subproduto disponível em grande escala, que não requer extração adicional, evitando a acumulação de resíduos e acrescentando valor a um recurso frequentemente subutilizado. O seu aproveitamento contribui ainda para mitigar um problema nacional: a acumulação de biomassa lenhosa nas florestas está associada ao aumento do risco de incêndios, e a valorização da casca em substratos constitui uma forma de reduzir este passivo ambiental (Reis, 2005; Brito & Mourão, 2012; Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 2016). Para além disso, por ser um produto nacional, elimina a necessidade de transporte de longa distância e reduz as emissões associadas à logística, reforçando a autossuficiência e a circularidade da economia florestal.

A perlite, por outro lado, implica impactos ambientais relevantes, derivados do processo industrial de expansão térmica que ocorre a temperaturas superiores a 1000 °C. Este procedimento consome grandes quantidades de energia, aumentando significativamente a pegada de carbono por unidade produzida (Maher et al., 2007). Apesar disso, continua a ser usada em proporções reduzidas para melhorar o arejamento em misturas de substratos.

3.6.4 Parâmetros para avaliar a qualidade de um substrato

A caracterização da qualidade de um substrato exige a consideração de múltiplos parâmetros físico-químicos e nutricionais, uma vez que estes influenciam de forma determinante a disponibilidade de nutrientes, o equilíbrio hídrico e a própria estrutura física do meio de cultivo. O pH é frequentemente apontado como um dos fatores críticos, pois condiciona a solubilidade de macro e micronutrientes e, conseqüentemente, a sua absorção pelas plantas (Kader et al., 2024). A CE e o teor de sais totais são igualmente relevantes, na medida em que refletem o grau de salinidade do substrato; níveis excessivos podem provocar stresse osmótico, redução da absorção de água e inibição do crescimento (Ferby et al., 2023).

A análise da MS e da humidade permite padronizar os resultados e avaliar a estabilidade do material, fornecendo informação fundamental sobre a disponibilidade de água e a conservação do substrato (Kader et al., 2024). Em paralelo, a determinação do azoto total, bem como das suas formas minerais, nítrica e amoniacal, é considerada indispensável, dado que estas constituem as principais fontes de azoto assimilável, com impacto direto na nutrição e no metabolismo vegetal (Qiu et al., 2025). De igual modo, os teores de fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O) fornecem uma medida da fertilidade do substrato, tendo em conta o papel do fósforo no desenvolvimento radicular e do potássio na regulação osmótica e na resistência a condições de stresse (Gruda, 2019; Qiu et al., 2025).

No que diz respeito às propriedades físicas, a Dap e a granulometria são amplamente utilizadas como indicadores da estrutura do substrato. A DAP reflete a compactação e a porosidade do material, enquanto a granulometria descreve a distribuição do tamanho de partículas, influenciando diretamente a retenção de água e a aeração. Ambos os parâmetros são determinantes para a expansão radicular e para a performance global do substrato em condições de cultivo sem solo (Blok & Wever, 2020).

Assim, a literatura reforça que a utilização combinada destes parâmetros permite uma avaliação integrada da qualidade de substratos, abrangendo dimensões físicas, químicas e nutricionais, assegurando uma caracterização fiável do seu potencial em sistemas de cultivo sem solo.

Capítulo IV- Materiais e Métodos

4. 1 Delineamento experimental

Foram definidos cinco tratamentos: um controlo, correspondente ao substrato comercial Nutrimais Universal, e quatro tratamentos experimentais elaborados com diferentes proporções de casca de pinheiro, turfa loira, perlite e Nutrimais (Tabela 10).

Tabela 9 Formulação dos substratos utilizados no ensaio, expressa em percentagem em volume (% v/v), com diferentes proporções de fibra de coco, casca de pinheiro, turfa loira, perlite e Nutrimais.

Tratamento	Fibra de coco	Casca de Pinheiro	Turfa Loira	Perlite	Nutrimais
C	40%	-	40%	10%	10%
T1	-	40%	40%	10%	10%
T2	-	30%	40%	10%	20%
T3	-	40%	30%	10%	20%
T4	-	50%	30%	10%	10%

Legenda: C – Controlo (substrato comercial com fibra de coco); T1–T4 – tratamentos experimentais com diferentes proporções de casca de pinheiro e Nutrimais

Estas formulações foram concebidas de modo a avaliar o efeito da substituição da fibra de coco pela casca de pinheiro, mantendo-se a turfa loira e a perlite como constituintes estruturais comuns. A comparação entre o tratamento controlo e os experimentais permitiu testar a viabilidade da utilização da casca de pinheiro como alternativa sustentável em substratos, promovendo simultaneamente a valorização de subprodutos florestais e a redução da dependência de matérias-primas importadas.

4.2 Matérias-primas utilizadas na formulação dos substratos

A formulação dos substratos recorreu a materiais de diversas origens, selecionados pela sua relevância agronómica e disponibilidade no mercado. A fibra de coco foi escolhida pela sua elevada capacidade de retenção de água e boa capacidade de arejamento, características que favorecem o enraizamento inicial. A turfa loira, material tradicionalmente utilizado em

horticultura, apresenta baixa Dap, elevada capacidade de retenção de água e um pH ligeiramente ácido, o que favorece a absorção de determinados nutrientes. A casca de pinheiro, subproduto abundante da indústria madeireira e de serração em Portugal, foi incluída como alternativa sustentável, procurando avaliar a sua adequação como substituto parcial da fibra de coco e da turfa. A perlite, material de origem mineral expandida, foi utilizada como agente estrutural para aumentar a macroporosidade do substrato, favorecendo a drenagem. Finalmente, o Nutrimais, corretivo orgânico comercial, contribuiu com matéria orgânica estabilizada e nutrientes essenciais, assegurando o crescimento inicial para as plantas.

4.3 Preparação dos substratos

A preparação das misturas foi realizada no CEL, em lotes homogêneos, assegurando que todos os componentes fossem bem incorporados antes do enchimento dos vasos. Para cada formulação, os materiais foram medidos em proporções volumétricas definidas, homogeneizados em recipientes de grandes dimensões e apenas depois transferidos para os vasos experimentais. Este procedimento garantiu que cada unidade experimental recebesse uma mistura idêntica.

Utilizaram-se vasos cilíndricos, com capacidade de 2,5 L (Figura 11), permitindo o desenvolvimento adequado das raízes das hortícolas estudadas. No total, foram preparados 150 vasos, distribuídos equitativamente entre as duas espécies: 75 destinados à alface e 75 à couve chinesa.



Figura 11 Envasamento do ensaio

4.4 Espécies utilizadas no ensaio

O ensaio foi realizado com duas espécies hortícolas de elevada importância económica e alimentar: a alface (*Lactuca sativa* L.) e a couve chinesa (*Brassica rapa* var. *chinensis*). A alface é uma das hortícolas mais cultivadas e consumidas em Portugal, caracterizando-se por apresentar um ciclo curto e elevada sensibilidade às condições ambientais e de substrato, razão pela qual é frequentemente utilizada em ensaios comparativos de meios de cultivo, conforme documenta a organização das Nações Unidas “Food and Agriculture Organization” (FAO) em publicações sobre hortícolas de folha e boas práticas em culturas protegidas (FAO, 2017).

Já a couve chinesa, pertencente à família *Brassicaceae* e originária da Ásia, encontra-se cada vez mais presente nos mercados europeus, sendo objeto de normalização comercial pela UNECE (2023). Esta espécie distingue-se pela sua sensibilidade às condições de cultivo, respondendo de forma rápida a variações na drenagem, arejamento, disponibilidade de nutrientes e retenção de água do substrato, característica destacada em orientações técnicas do serviço de extensão da Clemson University (Clemson HGIC, 2020). Além disso, apresenta um ciclo relativamente curto, permitindo a obtenção de resultados num período reduzido, e manifesta de forma evidente sintomas de excesso ou deficiência nutricional, sendo reconhecida pela literatura científica como bioindicador da qualidade do substrato (Michelon et al., 2021).

Os transplantes de ambas as espécies foram adquiridas num viveiro próximo das instalações da Lipor, já em fase de transplantação, com cerca de duas semanas de idade. A seleção das plântulas teve em conta a uniformidade em termos de tamanho e vigor, excluindo indivíduos com sintomas de deficiência nutricional ou má formação.

4.5 Instalação e condução do ensaio

O ensaio foi instalado a 30 de abril de 2025, na estufa que construímos na horta comunitária da Lipor (Figura 12), tendo decorrido até 2 de junho do mesmo ano, altura da colheita. A escolha da estufa como local de ensaio justificou-se pelas variações de temperatura e precipitação, e assim asseguramos condições de maior homogeneidade para todas as unidades experimentais.



Figura 12 Processo de construção da estufa e disposição dos vasos na estufa

A disposição dos vasos no interior da estufa foi organizada em blocos casualizados, conforme ilustrado na Figura 12 e cujo delineamento é apresentado em secção específica deste documento.

4.6 Cuidados, regas e tratamentos fitossanitários

A irrigação foi efetuada através de um sistema de rega composto por dois aspersores do tipo mariposa (Figura 13), caracterizados por um corpo circular achatado e uma peça rotativa em forma de borboleta que fragmenta o jato de água, simulando uma precipitação suave. Este sistema foi escolhido por permitir uma distribuição uniforme e delicada da água, reduzindo riscos de erosão do substrato e de danos mecânicos nas folhas jovens. A rega foi realizada diariamente às 05:00 h, prevenindo perdas por evaporação e otimizando a absorção pelas plantas.

Não foi aplicada adubação suplementar ao longo do ensaio, de modo a avaliar exclusivamente o efeito das formulações de substrato. Contudo, foi necessário proceder a um tratamento fitossanitário para controlo de caracóis e lesmas, pragas que causaram danos mais significativos nas plantas de couve chinesa. O tratamento consistiu na aplicação de um limacida em maio de 2025.



Figura 13 Disposição do sistema de rega

4.7 Medições do crescimento das plantas

As medições foram realizadas em dois momentos distintos ao longo do ensaio: uma avaliação intermédia e uma avaliação final. A avaliação intermédia foi efetuada cerca de três semanas após o início do ensaio, incluindo a determinação da altura da planta em centímetros, do diâmetro da copa em centímetros e do teor relativo de clorofila obtido através de leituras com o medidor SPAD. A avaliação final foi realizada no momento da colheita, a 2 de junho, e englobou as seguintes variáveis: altura da planta, diâmetro da copa, teor relativo de clorofila medido com o SPAD, número total de folhas, peso fresco da parte aérea e das raízes, peso seco da biomassa e teor de sólidos solúveis em graus Brix.

Para a determinação do peso fresco, as plantas foram separadas pela parte aérea e raízes, procedendo-se à lavagem cuidadosa destas últimas (Figura 14, (i)) para a remoção do substrato, e posteriormente pesadas em balança analítica. O peso seco foi obtido após secagem em estufa a 60–65 °C durante 48 horas até atingir peso constante (Figura 15, (ii)). O teor de sólidos solúveis foi determinado com recurso a refratómetro portátil.



Figura 14 (i) Lavagem das raízes, (ii) Folhas, caules e raízes na secagem em estufa

Todas as variáveis foram medidas com instrumentos devidamente calibrados, nomeadamente uma fita métrica para a altura e diâmetro, um medidor de clorofila SPAD-502 para as leituras de índice de clorofila, uma balança analítica (Figura 15) com precisão de $\pm 0,01$ g para as pesagens e um refratómetro portátil com intervalo de 0 a 30 por cento para o teor de sólidos solúveis.



Figura 15 Pesagem na balança analítica

4.8 Características físico-químicas dos substratos

Antes do início do ensaio, foi realizada a caracterização físico-química dos substratos e enviadas para um laboratório externo da Lipor, com o objetivo de determinar a sua composição inicial. Foram avaliados parâmetros como o pH, CE, o teor de sais solúveis, a matéria seca (MS) e a humidade, o conteúdo de nutrientes (azoto total, azoto nítrico, azoto amoniacal, fósforo e potássio), bem como a Dap e distribuição granulométrica dos substratos

4.9 Delineamento experimental e processamento estatístico

O ensaio destinado a avaliar o efeito de diferentes substratos sobre parâmetros de biomassa (ex.: peso fresco e seco), morfologia e fisiologia (ex.: SPAD) em alface e couve foi conduzido segundo um delineamento em blocos casualizados (DBC), composto por três blocos, cinco repetições, cinco tratamentos e duas espécies. cinco tratamentos, aplicados a duas espécies, cada um com três repetições e cinco vasos por repetição. No total, foram analisadas 150 unidades experimentais por variável, das quais 75 correspondem à alface e as restantes para couve. Cada vaso foi considerado como uma unidade experimental e alocada aleatoriamente dentro dos blocos, de modo a reduzir variações não relacionadas ao efeito dos substratos.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada separadamente para cada variável (biomassa, parâmetros morfológicos e fisiológicos), com o objetivo de verificar o efeito dos tratamentos associados aos diferentes substratos testados. Antes da aplicação da ANOVA, foram avaliados os pressupostos do modelo: normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk), homogeneidade das variâncias (teste de Levene) e independência dos erros (avaliação gráfica dos resíduos). Sempre que algum desses pressupostos foi violado, aplicou-se a transformação Box-Cox para corrigir a distribuição dos dados e garantir a validade da análise. Nestes casos, a ANOVA foi conduzida com os dados transformados.

O modelo estatístico da ANOVA utilizado foi:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

onde:

- Y_{ij} é o valor observado da variável resposta no tratamento i e bloco j ,
- μ é a média geral,
- τ_i é o efeito fixo do i -ésimo tratamento,
- β_j é o efeito fixo do j -ésimo bloco,
- ε_{ij} é o erro aleatório associado à observação, assumido com distribuição normal $N(0, \sigma^2)$, independente e com variância homogênea.

Devido à limitação do número de observações, a variável grau Brix foi analisada de forma independente, segundo um delineamento completamente casualizado. Sempre que a ANOVA revelou diferenças significativas ($p < 0,05$), aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Duncan, o qual permitiu identificar diferenças estatisticamente relevantes entre os tratamentos. Os resultados foram apresentados graficamente e os quadros, com representação das médias, desvios-padrão e letras indicativas dos agrupamentos homogêneos.

A verificação detalhada dos pressupostos da ANOVA, bem como os quadros completos da decomposição da variância (Soma dos Quadrados, Graus de Liberdade, valores de F e respectivos p-valores), encontram-se apresentados em Anexo 1 e 2. No corpo do texto são discutidos apenas os valores de p relevantes para a interpretação dos efeitos dos substratos.

Capítulo V - Resultados e Discussão

5.1 Características dos substratos

A leitura conjunta das Tabelas 11 e 12 permite perceber de que forma as propriedades iniciais dos substratos condicionaram o crescimento das culturas.

O controlo, constituído por fibra de coco, apresentou pH alcalino (7,5), CE moderada (677 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e baixo teor de sais (1,8 g/L). Destacou-se pela granulometria mais heterogénea, incluindo 9,5% de partículas grosseiras de 10–20 mm, o que sugere maior macroporosidade e melhor equilíbrio entre retenção de água e arejamento, aspetos considerados determinantes para a qualidade de substratos hortícolas (Gruda, 2009; Sonneveld & Voogt, 2009).

Tabela 10 Principais características físico-químicas dos substratos.

	C	T1	T2	T3	T4
pH	7,5	6	6,7	6,6	6,1
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	677	641	1174	1213	654
Sal (g/L)	1,8	1,7	3,1	3,2	1,7
MS (%)	41,5	52,7	55,4	50,6	51,8
Humidade (%)	58,5	47,3	44,6	49,4	48,2
Azoto total (% M.S.)	1,31	1,12	1,66	1,55	1,07
Azoto nítrico (mg/kg M.S.)	12,5	334,7	239,8	390,4	145,4
Azoto amoniacal (mg/kg M.S.)	334,2	17,1	180,4	142,1	31,3
Fósforo (P_2O_5) (% M.S.)	0,59	0,34	0,69	0,69	0,37
Potássio (K_2O) (% M.S.)	1,2	0,71	1,19	1,22	0,76
Dap fresco (g/L)	380	389	406	444	409
Dap M.S. (g/L)	158	205	225	224	212

O T1 apresentou pH ácido (6,0), CE baixa (641 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e reduzido teor de sais (1,7 g/L). A estrutura foi dominada por partículas finas (52,5%) e médias (26,8%), praticamente sem fração grosseira. Estruturas mais finas e pobres em nutrientes podem limitar a

disponibilidade hídrica e a fertilidade inicial, tal como apontado por Nerlich et al. (2021) e Dias et al. (2025).

O T2 (30% casca + 20% Nutrimais) destacou-se pelo aumento da fertilidade: CE de 1174 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sais 3,1 g/L, azoto nítrico elevado (239,8 mg/kg MS), fósforo (0,69%) e potássio (1,19%). Apesar da predominância de partículas finas (53,8% <1 mm), a maior proporção de composto contribuiu para um aporte nutricional inicial superior.

O T3 (40% casca + 20% Nutrimais) registou valores semelhantes a T2, mas ainda mais elevados: CE de 1213 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sais 3,2 g/L e o maior teor de azoto nítrico (390,4 mg/kg MS). A densidade aparente fresca foi também a mais elevada (444 g/L), sinalizando um substrato mais compacto. Ainda assim, o reforço nutricional inicial pode compensar limitações estruturais, de acordo com Zhu et al. (2021) e Ma et al. (2022).

O T4 (50% casca + 10% Nutrimais) apresentou pH de 6,1, CE baixa (654 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e valores reduzidos de nutrientes (N total 1,07%; P_2O_5 0,37%; K_2O 0,76%). Diferenciou-se pela maior percentagem de partículas médias (33,3%), sugerindo alguma melhoria na drenagem, mas insuficiente para colmatar a baixa fertilidade inicial.

Tabela 11 Distribuição granulométrica dos substratos.

	C	T1	T2	T3	T4
Partículas <1 mm (%)	52	52,5	53,8	50,7	46,1
Partículas 1–2 mm (%)	16,9	19	20,1	20,7	18,7
Partículas 2–5 mm (%)	14,2	26,8	24,1	25,4	33,3
Partículas 5–10 mm (%)	7,3	1,6	2,1	3,2	1,7
Partículas 10–20 mm (%)	9,5	<0.1	<0.1	<0.1	0,2
Partículas 20–25 mm (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Partículas >25 mm (%)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

De forma geral, o controlo evidenciou um equilíbrio estrutural favorável. Os tratamentos T1 e T4 apresentaram menor disponibilidade de nutrientes e textura fina, ao passo que T2 e T3 combinaram maior fertilidade química, proporcionada pelo aumento de Nutrimais, com uma estrutura menos porosa e mais compacta.

5.2 Ensaio da cultura da alface

5.2.1 Crescimento vegetativo

O crescimento vegetativo da alface foi acompanhado através do diâmetro da planta, altura, número de folhas e índice SPAD. A análise dos dados mostrou que a composição do substrato influenciou o desenvolvimento das plantas, ainda que o efeito tenha variado entre os diferentes parâmetros e nem sempre se tenha traduzido em diferenças estatisticamente significativas.

Ao longo do ensaio, seguido por T2 e T3, enquanto T1 e T4 registaram os valores mais baixos. No entanto, as diferenças entre os tratamentos não foram estatisticamente significativas ($p > 0,05$).

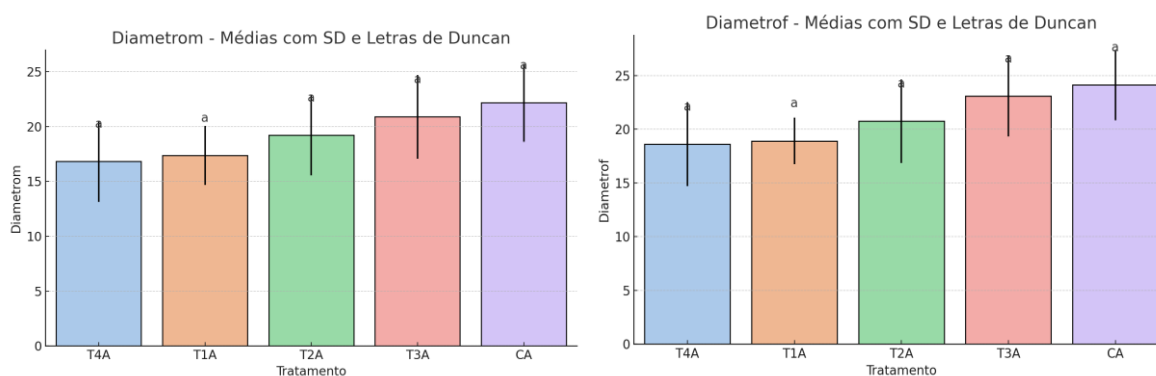


Figura 16 Médias do diâmetro da alface (*Lactuca sativa* L.), expresso em centímetros (cm), avaliadas a meio do ensaio (i) e no final do ensaio (ii), para os diferentes tratamentos experimentais. As barras de erro representam o desvio padrão das médias. A identificação e composição dos tratamentos encontram-se descritas na **Tabela 10**.

Apesar da ausência de significância estatística, a tendência observada sugere que o controlo beneficiou de uma estrutura física mais equilibrada, assegurada pela presença de partículas grosseiras e pela maior heterogeneidade granulométrica (Gruda, 2009; Carmona et al., 2023). Já nos tratamentos com maior percentagem de casca de pinheiro, a predominância de partículas finas poderá ter reduzido a disponibilidade de água facilmente utilizável e favorecido fenómenos de imobilização de nutrientes, como referido por Schäfer et al. (2015) e Wu et al. (2025). O aumento de Nutrimais em T2 e T3 parece ter compensado parcialmente estas limitações, refletindo-se em valores de diâmetro mais próximos do controlo.

De forma global, conclui-se que o diâmetro da alface não variou significativamente entre tratamentos, mas as tendências observadas apontam para uma influência conjunta da estrutura física e da disponibilidade nutricional na formação da cabeça e, consequentemente, no rendimento potencial da cultura.

5.2.1.2 Altura

A Figura 17 mostra que as diferenças de altura entre tratamentos foram pouco expressivas, não se verificando diferenças estatisticamente significativas. O controlo e o T3 apresentaram as maiores médias, mas os restantes tratamentos mantiveram-se próximos, formando um grupo estatisticamente homogéneo.

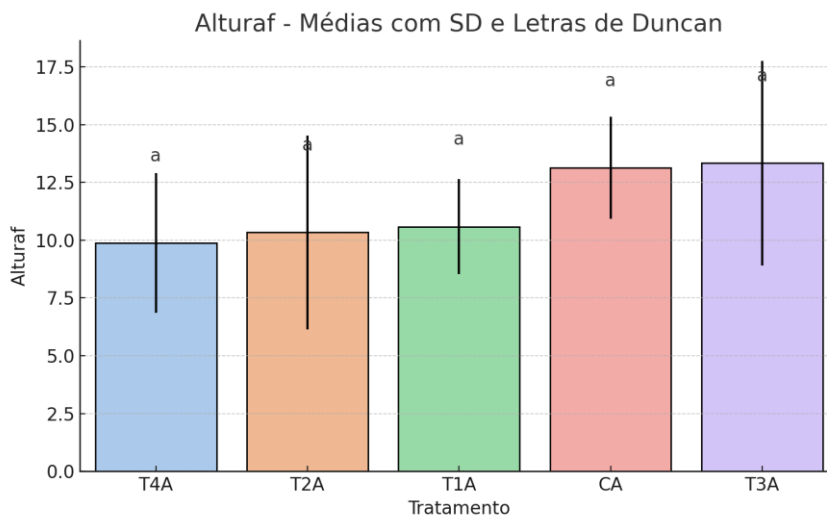


Figura 17 Médias feitas no final do ensaio da variável altura (cm) e para os diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

Este resultado sugere que a altura da alface não é um parâmetro suficientemente sensível para discriminar o efeito das formulações de substrato. Além disso, trata-se de uma variável fortemente influenciada por fatores ambientais, em particular pela intensidade e qualidade da luz disponível durante o ciclo cultural, como demonstrado por Miao et al. (2023) e Dai et al. (2024), onde variações na luminosidade afetaram diretamente a altura das plantas de alface.

A literatura confirma esta tendência: estudos de Hernández et al. (2023) e Ferrarezi et al. (2024) indicam que a altura raramente varia de forma significativa quando os substratos cumprem requisitos mínimos de porosidade e disponibilidade de nutrientes. Por essa razão, parâmetros como diâmetro, número de folhas, biomassa e índices de clorofila são considerados indicadores mais fiáveis para avaliar a resposta a diferentes misturas (Blok & Fuchs, 2022).

Desde modo, embora a altura da alface tenha apresentado valores ligeiramente superiores no controlo e em T3, os resultados reforçam que esta variável possui menor valor discriminatório, sendo mais dependente de condições de luminosidade do que da composição do substrato. A análise seguinte, referente ao número de folhas (Gráfico 3), revelou-se mais sensível para evidenciar as diferenças entre tratamentos.

5.2.1.3 Número de folhas

Entre os parâmetros avaliados no crescimento vegetativo, o número de folhas apresentou algumas tendências de variação entre os substratos, mas as diferenças não foram estatisticamente significativas ($p > 0,05$). Como ilustrado na Figura 18, o controlo e o T3 registaram, em média, valores ligeiramente superiores, enquanto os restantes tratamentos permaneceram abaixo, formando um grupo estatisticamente homogéneo.

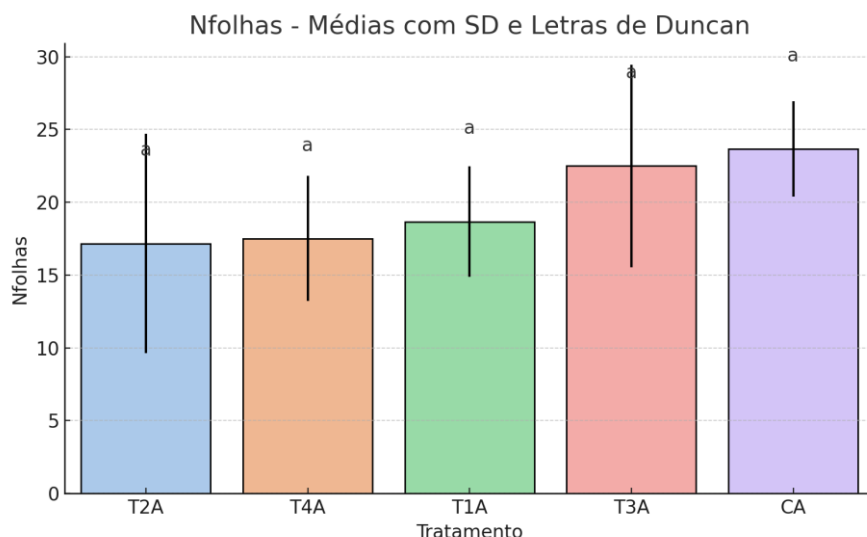


Figura 18 Número de folhas da alface para os diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

Embora sem significância estatística, a tendência observada sugere que a emissão foliar da alface pode depender do equilíbrio entre estrutura física e aporte nutritivo. No controlo, a diversidade granulométrica e a presença de fibra de coco favoreceram a estabilidade hídrica, enquanto em T3 a maior percentagem de Nutrimais poderá ter compensado as limitações da casca de pinheiro, reduzindo potenciais efeitos de imobilização de nutrientes. Tendências semelhantes foram descritas por Oliveira et al. (2014) e Torres et al. (2021), que destacam o número de folhas como um parâmetro sensível à presença de matéria orgânica estabilizada.

Por outro lado, os tratamentos com apenas 10% de Nutrimais (T1 e T4) apresentaram médias mais baixas, ainda que estatisticamente não diferentes dos demais, possivelmente devido à limitação nutricional associada à elevada proporção de casca de pinheiro. De acordo com Schäfer et al. (2015) e Wu et al. (2025), substratos com elevado teor de material lenhoso tendem a reduzir a emissão foliar, em virtude da competição microbiana pelo azoto disponível.

Assim, apesar da ausência de diferenças significativas, o número de folhas revelou-se um parâmetro útil para detetar tendências de resposta às formulações, refletindo a interação entre a estrutura física do substrato e o fornecimento nutricional.

5.2.2 SPAD

O índice SPAD não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$), embora se tenham observado tendências de variação (Figura 19). O controlo e o T3 registaram, em média, os valores mais elevados, enquanto T1 e T4 apresentaram as médias mais baixas e T2 manteve-se numa posição intermédia.

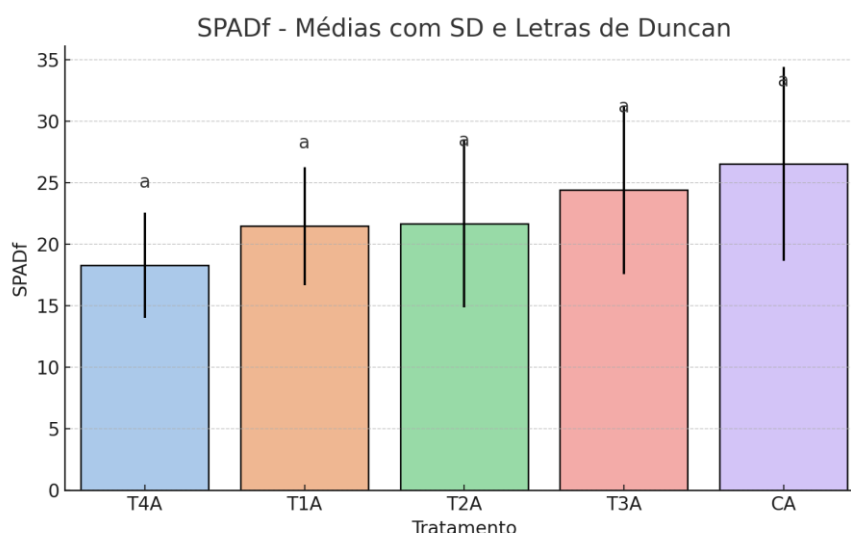


Figura 19 Médias da variável SPAD final do ensaio da alface para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

Apesar da ausência de significância, o padrão observado sugere que a concentração de clorofila e, por consequência, a atividade fotossintética tende a ser favorecida em substratos que combinam equilíbrio físico e disponibilidade de nutrientes. No controlo, a retenção hídrica adequada associada ao aporte nutricional moderado pode ter contribuído para a manutenção da coloração verde intensa e do vigor foliar. Em T3, a maior percentagem de Nutrimais parece ter compensado parcialmente as limitações da casca de pinheiro, aproximando os valores ao do controlo. Estudos recentes confirmam que a incorporação de matéria orgânica estabilizada pode reduzir a imobilização de azoto típica de materiais lenhosos e contribuir para maiores teores de clorofila (Dias et al., 2025).

Já os valores médios mais baixos em T1 e T4 refletem a menor incorporação de Nutrimais. Nestes casos, a predominância de partículas lenhosas favorece a imobilização de azoto e limita a absorção de nutrientes essenciais, resultando em folhas menos verdes e

fisiologicamente menos ativas, conforme descrito por Schäfer et al. (2015) e Wu et al. (2025). De forma geral, o índice SPAD não diferenciou significativamente os tratamentos, mas mostrou-se útil para indicar tendências de resposta da alface ao equilíbrio físico-químico dos substratos, antecipando os efeitos que se confirmam posteriormente na biomassa acumulada.

5.2.3 Produção de biomassa fresca e seca

A Tabela 13 apresenta os valores médios de peso fresco (PF) e peso seco (PS) da alface para folhas, caule, raízes e total.

O controlo (fibra de coco) obteve os maiores valores de peso fresco total (117,49 g), destacando-se sobretudo nas folhas (86,46 g). Este desempenho confirma que a fibra de coco assegura um equilíbrio favorável entre retenção de água e oxigénio, refletindo-se em tecidos mais túrgidos. Além disso, também apresentou o maior peso seco radicular (2,73 g), sugerindo melhor desenvolvimento e exploração do sistema radicular.

Nos tratamentos com maior proporção de casca de pinheiro, em especial T4, observaram-se reduções expressivas da biomassa fresca, sobretudo nas folhas (23,84 g), o que indica limitações ao crescimento vegetativo. A elevada percentagem de casca pode ter contribuído para maior drenagem e menor disponibilidade de água útil (Handreck, 1983; Reis, 2009), além da possível imobilização de azoto em material lenhoso pouco estabilizado (Maher et al., 2007).

O T3, apesar de apresentar peso fresco inferior ao controlo (102,22 g), revelou um valor elevado de peso seco total (8,94 g), próximo do observado no controlo (10,21 g). Este resultado sugere folhas menos suculentas e tecidos mais densos, consequência provável da maior densidade do substrato, mas sustentados por um aporte nutricional consistente proporcionado pelos 20% de Nutrimais. Tendência semelhante foi descrita por Brito & Mourão (2012), que verificaram maior acumulação de biomassa estrutural em misturas enriquecidas com composto.

No T1 e T2, com apenas 10% e 20% de Nutrimais respetivamente, os valores de biomassa foram intermediários, mas em geral inferiores aos do controlo. Ainda assim, as diferenças nas raízes foram menos pronunciadas, confirmando que este órgão é menos sensível às variações físicas e químicas dos substratos.

Tabela 12 Peso fresco (PF) e seca (PS) da alface (média $\pm$ desvio padrão, g) para folhas, caule, raízes e total, nos diferentes tratamentos. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

	CA	T1A	T2A	T3A	T4A
PS_Folhas	6.20 $\pm$ 1.89	3.79 $\pm$ 1.20 b	3.98 $\pm$ 2.02 b	6.33 $\pm$ 2.15	3.63 $\pm$ 1.40 b
PS_Caule	1.28 $\pm$ 0.43	0.73 $\pm$ 0.20 b	0.62 $\pm$ 0.36 b	1.01 $\pm$ 0.38	0.76 $\pm$ 0.30 b
PS_Raiz	2.73 $\pm$ 2.36	1.44 $\pm$ 0.60	1.15 $\pm$ 0.67 b	1.61 $\pm$ 0.56	1.51 $\pm$ 0.41
PS_Total	10.21 $\pm$ 4.26	5.96 $\pm$ 1.64 b	5.74 $\pm$ 2.53 b	8.94 $\pm$ 2.67	5.90 $\pm$ 1.91 b
PF_Folhas	86.46 $\pm$ 32.20	55.78 $\pm$ 17.32 b	53.24 $\pm$ 29.53 b	32.76 $\pm$ 5.42 b	23.84 $\pm$ 5.56 c
PF_Caule	8.03 $\pm$ 3.03	5.26 $\pm$ 2.11	4.66 $\pm$ 2.81	9.53 $\pm$ 4.75 b	5.06 $\pm$ 1.78
PF_Raiz	23.00 $\pm$ 7.78	19.42 $\pm$ 5.79	13.57 $\pm$ 7.95	20.52 $\pm$ 10.62	21.87 $\pm$ 8.31
PF_Total	117.49 $\pm$ 35.16	80.46 $\pm$ 22.54	72.77 $\pm$ 35.79 b	102.22 $\pm$ 51.61	50.23 $\pm$ 19.06 b

Assim, os resultados confirmam que a fibra de coco proporciona um substrato fisicamente equilibrado, favorecendo o desenvolvimento global da alface (Raviv et al., 2002; Reis, 2005). O desempenho de T3 mostra, contudo, que misturas com casca e Nutrimais podem aproximar-se em termos de produção estrutural, desde que mantenham o equilíbrio físico-químico considerado ideal para substratos hortícolas (De Boodt & Verdonck, 1972).

5.2.4 Grau Brix

Os resultados (Figura 20) indicam que o teor de sólidos solúveis (grau Brix) das folhas de alface não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$). Ainda assim, observaram-se pequenas variações: o controlo (CA) e o T1 registaram valores médios ligeiramente superiores, enquanto T2, T3 e T4 apresentaram valores semelhantes entre si, mas ligeiramente mais baixos.

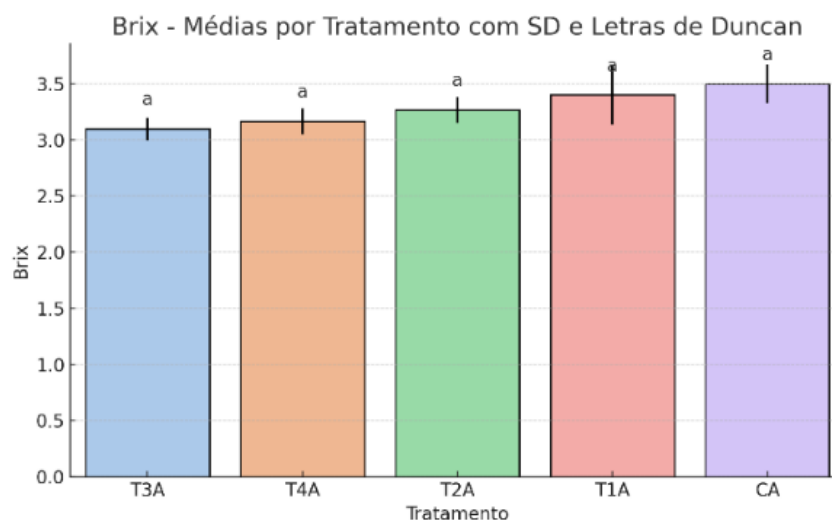


Figura 20 Médias da variável Brix da planta de alface para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

Quando analisados em conjunto, a qualidade organolética da alface, expressa pela concentração de açúcares e outros compostos solúveis, manteve-se estável independentemente da formulação do substrato. Este comportamento sugere que, ao contrário da biomassa, o grau Brix é um parâmetro menos sensível às diferenças físico-químicas do meio de cultivo. Tal como referido por Sonneveld & Voogt (2009), a acumulação de açúcares nas folhas depende sobretudo de fatores ambientais, como radiação luminosa, temperatura e disponibilidade hídrica, e não exclusivamente da composição do substrato. A ausência de diferenças significativas está em linha com os resultados de Hernández et al. (2023) e Ferrarezi et al. (2024), que também reportaram valores semelhantes de Brix em alfaces cultivadas sob diferentes substratos, desde que as condições de rega fossem controladas.

Desta maneira, a ligeira tendência para valores mais elevados no controlo e em T1 pode estar associada a maior estabilidade hídrica nestes tratamentos. Um balanço adequado entre água disponível e arejamento pode induzir um stress osmótico moderado, favorecendo a acumulação de sólidos solúveis, fenómeno descrito por Santos (2012) em hortícolas de folha. Pelo contrário, em substratos com maior percentagem de casca de pinheiro ou Nutrimais (T3 e T4), o crescimento mais limitado pode ter restringido a taxa fotossintética e, consequentemente, a síntese e acumulação de açúcares.

5.3 Ensaio da cultura da couve chinesa

5.3.1 Crescimento vegetativo

O crescimento da couve foi avaliado através de parâmetros como diâmetro, altura, número de folhas, índice SPAD e produção de biomassa. Os resultados mostram que a composição dos substratos influenciou o desempenho das plantas, embora os efeitos tenham variado consoante o parâmetro em análise.

5.3.1.1 Diâmetro

No que respeita ao diâmetro da copa, o maior valor foi registado no Tratamento T3 (Figura 21), o que se traduziu em plantas mais vigorosas e com uma expansão foliar acentuada. Este resultado está diretamente associado ao maior aporte de nutrientes proporcionado pela incorporação de 20% de Nutrimais, elemento essencial para a síntese proteica e para a expansão celular (Guo et al., dois mil e vinte; Ma et al., 2022). Os restantes tratamentos, nomeadamente o controlo, o Tratamento T1 e o Tratamento T4, apresentaram copas mais reduzidas, limitadas pela menor fertilidade inicial dos substratos.

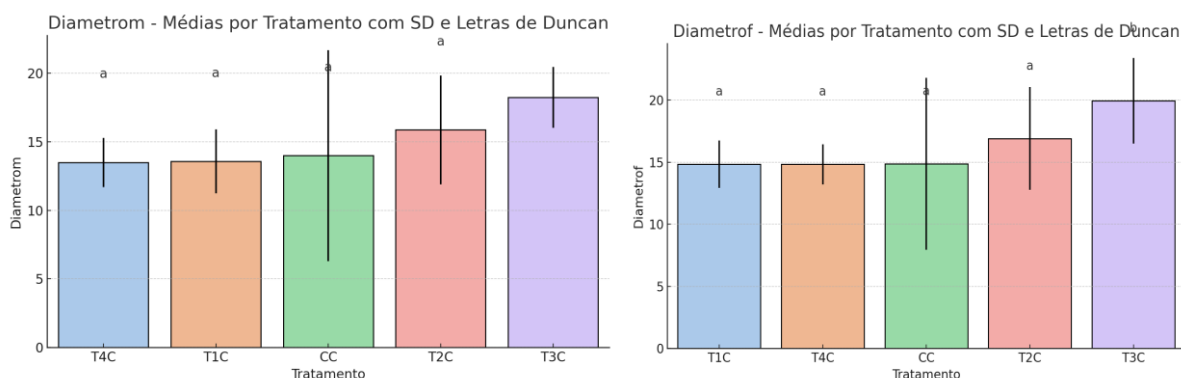


Figura 21 Médias da variável do diâmetro(cm) a meio do ensaio (i) e no final (figura ii) da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

A comparação com a alface evidencia um comportamento oposto. Enquanto na alface o controlo apresentou o maior diâmetro, beneficiando da estrutura física equilibrada da fibra de coco, que assegurou uma boa relação entre ar e água (Abad et al., 2002; Raviv et al., 2002), na couve chinesa foi o Tratamento T3 que se destacou, confirmando que, para esta espécie, a fertilidade do substrato se revelou mais determinante do que a componente estrutural.

Portanto, a análise conjunta das duas culturas permite concluir que cada espécie valoriza de forma distinta as características do substrato. A alface depende sobretudo da estrutura

física para otimizar o crescimento vegetativo, enquanto a couve chinesa responde mais intensamente ao fator nutricional, maximizando a expansão lateral da copa em misturas mais férteis.

5.3.1.2 Altura

A maior altura média da couve chinesa foi registada no Tratamento T3, com cerca de dezanove centímetros, seguido do Tratamento T2, que atingiu aproximadamente dezoito centímetros. Os restantes tratamentos apresentaram valores mais baixos, situando-se entre quinze e dezassete centímetros (Figura 22). Este resultado evidencia que a maior disponibilidade de nutrientes, em particular de azoto, proporcionada pelo aumento da percentagem de Nutrimais, favoreceu a elongação celular e o alongamento do caule, fenómeno descrito em brassicáceas por Zhu et al. (2021) e Ma et al. (2022).

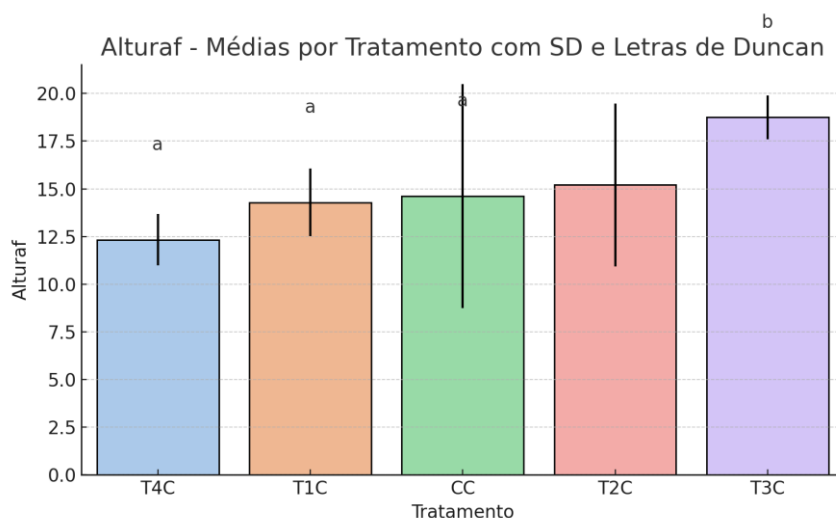


Figura 22 Médias da variável da altura (cm) da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

Quando comparado com a alface, observa-se um comportamento distinto. Na alface, as maiores alturas ocorreram no controlo, sustentadas pela estrutura física equilibrada do substrato, em especial pela presença de fibra de coco, que assegurou maior disponibilidade hídrica e melhor aeração (Reis, 2005; Gruda & Schnitzler, 2004). Já na couve chinesa, o aumento da altura verificou-se mesmo em substratos fisicamente menos favoráveis, desde que a fertilidade fosse elevada, confirmando a maior dependência desta espécie da nutrição mineral e orgânica em detrimento da estrutura física.

5.3.1.3 Número de folhas

O número de folhas da couve chinesa foi maximizado no Tratamento T3, com uma média de cerca de doze folhas por planta, o que traduz uma maior capacidade de emissão foliar. Este parâmetro tem particular relevância comercial, uma vez que a parte colhida e consumida desta cultura corresponde precisamente às folhas. De acordo com Wang et al. (2023) e Hernández et al. (2023), a emissão de novas folhas está diretamente relacionada com a fertilidade do substrato e com a disponibilidade contínua de nutrientes, fatores que explicam o desempenho superior de T3.

Nos tratamentos T1 e T4 (Figura 23), caracterizados por menor incorporação de Nutrimais, a emissão foliar revelou-se mais limitada, reduzindo o potencial produtivo da cultura. Esta limitação nutricional associada a misturas com maior proporção de casca de pinheiro já foi descrita por diversos autores como condicionante da taxa de formação de folhas em hortícolas, devido à imobilização microbiana de azoto.

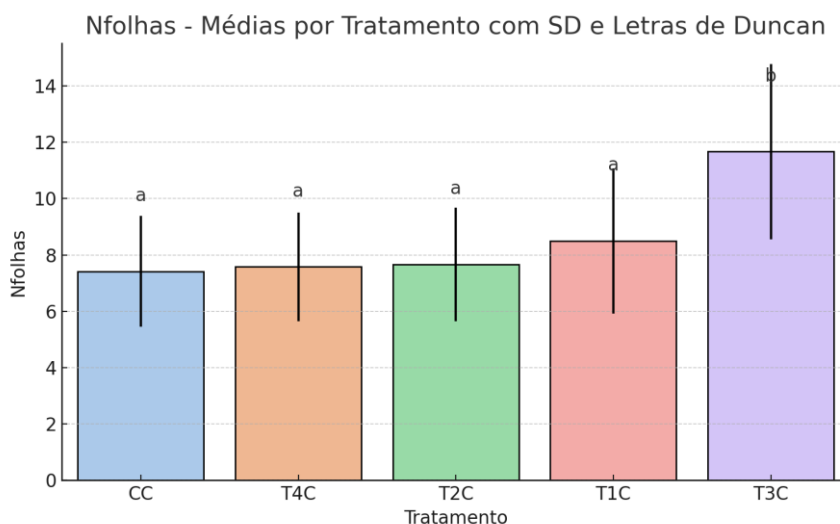


Figura 23 Número de folhas da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

Ao comparar com a alface, observa-se um padrão distinto. Embora também tenham surgido variações no número de folhas entre os substratos, estas foram menos acentuadas, evidenciando que a alface é menos sensível à fertilidade química e mais dependente de condições físicas adequadas, nomeadamente da relação ar/água do substrato (Handreck, 1983; Nerlich et al., 2021).

5.3.2 SPAD

Os resultados do índice SPAD na couve chinesa evidenciaram diferenças marcantes entre

os tratamentos (Figura 24). O valor mais elevado foi registado no Tratamento T3, seguido do Tratamento T2, enquanto o controlo, o Tratamento T1 e o Tratamento T4 apresentaram valores mais baixos. Estes resultados demonstram que a fertilidade do substrato exerceu um impacto direto no teor de clorofila, sendo que a incorporação de Nutrimais, sobretudo na proporção de vinte por cento, assegurou maior disponibilidade de nutrientes e, por consequência, maior capacidade de síntese de clorofila. O SPAD, enquanto indicador não destrutivo, encontra-se fortemente correlacionado com o estado nutricional em azoto, e o aumento registado em T3 confirma que esta cultura responde positivamente ao enriquecimento do substrato, em concordância com os trabalhos de Netto et al. (2005) e Yang et al. (2020), que associam valores mais elevados de SPAD a maior eficiência fotossintética e maiores rendimentos em brassicáceas.

Nos tratamentos com menor incorporação de Nutrimais, como T1 e T4, o SPAD manteve-se em níveis reduzidos, o que sugere deficiências nutricionais, nomeadamente em azoto, comprometendo a eficiência da fotossíntese e, em consequência, a produção de biomassa. Este padrão é consistente com as observações de Zhu et al. (2021), que verificaram que a couve chinesa é particularmente sensível à variação na disponibilidade de azoto, refletindo de imediato essa limitação nos teores de clorofila.

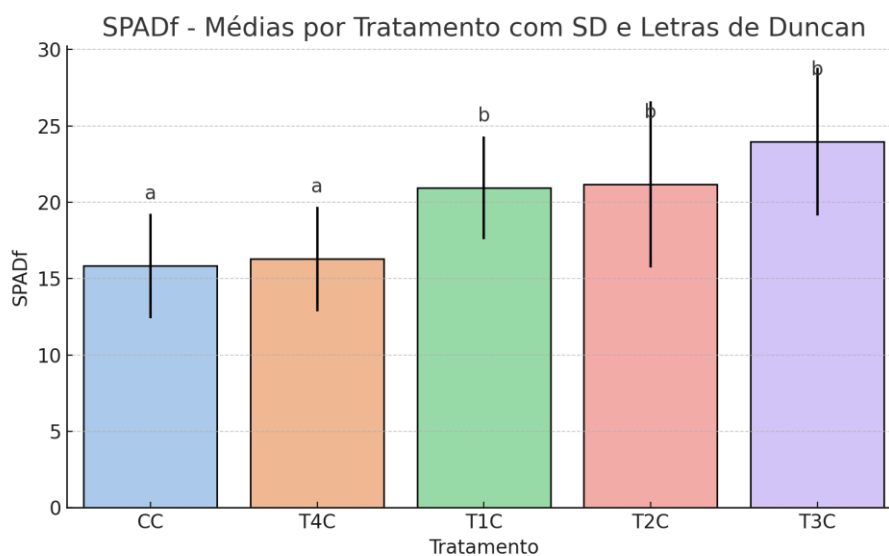


Figura 24 Médias da variável do SPAD da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

Quando comparado com a alface, o comportamento foi distinto. Nesta cultura, as diferenças no SPAD entre tratamentos foram pouco expressivas e não significativas, indicando que a alface não depende de forma tão direta do enriquecimento nutricional, mas sim do equilíbrio físico do substrato para sustentar o crescimento. Já a couve chinesa respondeu de forma

clara ao aumento de fertilidade, confirmando a sua maior exigência nutricional e a utilidade do SPAD como indicador fiável do estado de azoto nesta espécie.

5.3.3 Produção de biomassa fresca e seca

A análise da produção de biomassa da couve chinesa (Tabela 14) revelou diferenças consistentes entre os tratamentos, tanto no peso fresco como no peso seco. Nas folhas, o Tratamento T3 apresentou os maiores valores de peso fresco, destacando-se significativamente em relação aos restantes. Este resultado indica que a incorporação de vinte por cento de Nutrimais aumentou a disponibilidade de nutrientes, em particular de azoto, favorecendo o crescimento da parte aérea. Este comportamento está em consonância com os trabalhos de Guo et al. (2020) e Ma et al. (2022), que referem a resposta acentuada das brassicáceas ao enriquecimento nutricional dos substratos. O peso seco das folhas acompanhou a mesma tendência, confirmando que a maior fertilidade se refletiu não apenas em tecidos mais suculentos, mas também em maior acumulação de matéria estrutural. Em contraste, os valores mais baixos foram registados no Tratamento T4 e no controlo, revelando que, nesta cultura, a fertilidade desempenha um papel mais determinante do que a estrutura física do substrato.

No caule, verificou-se igualmente a superioridade do Tratamento T3, tanto em peso fresco como em peso seco, evidenciando maior engrossamento e desenvolvimento dos tecidos de suporte. Tal resposta pode ser explicada pelo efeito do azoto na síntese de proteínas estruturais e no alongamento celular, como já demonstrado por Zhu et al. (2021). Já os tratamentos com menor fertilidade inicial, como o Tratamento T1 e o Tratamento T4, apresentaram caules menos desenvolvidos, refletindo limitações no fornecimento de nutrientes essenciais.

Em relação às raízes, o Tratamento T3 voltou a apresentar os maiores valores de peso fresco e seco, indicando que o aumento da fertilidade não beneficiou apenas a parte aérea, mas também promoveu o crescimento radicular. Esta resposta sugere maior capacidade de exploração do meio e, consequentemente, maior eficiência de absorção. Nos tratamentos com menor disponibilidade de nutrientes, como o Tratamento T1 e o Tratamento T4, os valores mais baixos podem estar associados à limitação de azoto, comprometendo a formação do sistema radicular. Este padrão está em concordância com Abad et al. (2004), que destacam que substratos pouco férteis restringem o desenvolvimento radicular, mesmo quando as condições físicas se mantêm adequadas.

Tabela 13 Peso fresco (PF) e seca (PS)(g) da couve chinesa (média $\pm$ desvio padrão, g) para folhas, caule, raízes e total, nos diferentes tratamentos. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

	CC	T1C	T2C	T3C	T4C
PF_Folhas	36.25 $\pm$ 20.93	19.04 $\pm$ 7.46	31.78 $\pm$ 16.25	57.30 $\pm$ 25.32 b	26.33 $\pm$ 13.34 a
PF_Caule	2.83 $\pm$ 0.49	2.25 $\pm$ 0.92	2.14 $\pm$ 0.73	3.33 $\pm$ 1.08 b	2.65 $\pm$ 1.29
PF_Raiz	11.25 $\pm$ 5.38	9.28 $\pm$ 3.78	11.12 $\pm$ 1.85	13.91 $\pm$ 7.45	13.25 $\pm$ 10.08 a
PF_Total	50.34 $\pm$ 24.97	26.61 $\pm$ 11.86	45.05 $\pm$ 17.73	74.54 $\pm$ 31.18 b	42.23 $\pm$ 21.51
PS_Folhas	4.66 $\pm$ 2.83	2.66 $\pm$ 0.94	4.21 $\pm$ 2.17	5.41 $\pm$ 2.14 b	2.43 $\pm$ 0.82
PS_Caule	0.52 $\pm$ 0.19	0.46 $\pm$ 0.15	0.34 $\pm$ 0.16	0.52 $\pm$ 0.22	0.49 $\pm$ 0.27
PS_Raiz	1.15 $\pm$ 0.44	1.20 $\pm$ 0.37	1.19 $\pm$ 0.32	1.79 $\pm$ 1.09	1.63 $\pm$ 1.24
PS_Total	5.96 $\pm$ 3.42	4.31 $\pm$ 0.97	5.56 $\pm$ 2.72	7.72 $\pm$ 3.22 b	4.56 $\pm$ 1.95

Ao comparar com a alface, observa-se um comportamento oposto. Enquanto na alface a maior biomassa foi obtida no controlo, graças ao equilíbrio físico proporcionado pela fibra de coco, na couve chinesa foi o Tratamento T3 que se destacou, confirmando que esta espécie valoriza mais a fertilidade do que a estrutura física do substrato. Este contraste reforça a conclusão de que as duas culturas apresentam exigências distintas: a alface responde sobretudo à estrutura, enquanto a couve chinesa depende prioritariamente da disponibilidade nutricional para maximizar a produção de biomassa.

5.3.4 Grau Brix

A determinação do grau Brix na couve chinesa não revelou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, e os valores registados foram muito próximos entre si (Figura 25). Em alguns casos observaram-se pequenas variações, mas sem tendência consistente que permita uma interpretação segura. Esta limitação está associada ao reduzido número de observações e à variabilidade dos dados, o que dificultou a obtenção de resultados fiáveis.

Ainda assim, de forma exploratória, notou-se uma ligeira tendência para valores um pouco mais elevados nos tratamentos com maior proporção de casca de pinheiro, o que poderia estar relacionado com algum stress hídrico moderado que, em teoria, favorece a concentração de sólidos solúveis nos tecidos. Situação semelhante foi observada na alface, onde também não se registaram diferenças estatisticamente relevantes, mas se notou que valores de Brix tendiam a ser um pouco mais altos em substratos menos férteis ou mais drenantes.

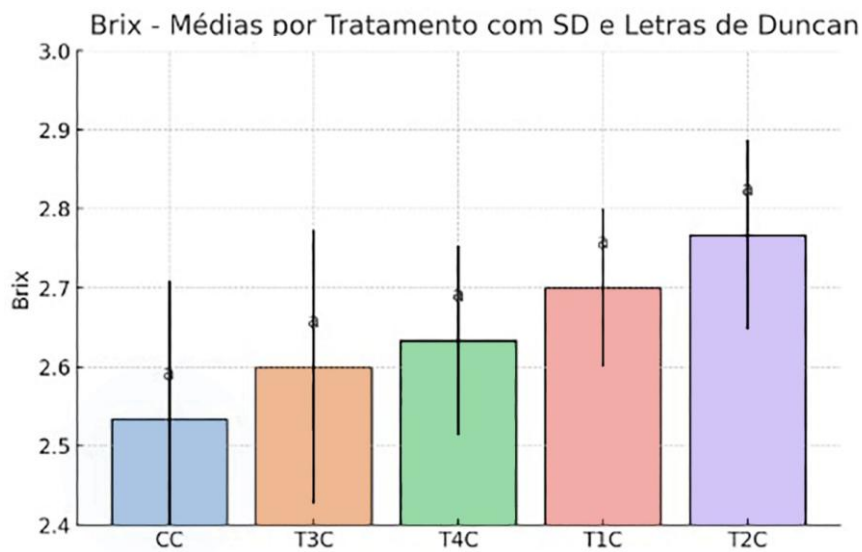


Figura 25 Médias da variável Brix da planta da couve chinesa para diferentes tratamentos, com barras de erro representando o desvio padrão

Esta comparação sugere que, em ambas as culturas, o grau Brix é menos sensível às características dos substratos do que outros parâmetros como biomassa ou crescimento vegetativo. Além disso, confirma que fatores externos, como intensidade de luz, temperatura e regime de rega, terão tido um peso muito superior à composição do substrato. Por estas razões, os resultados obtidos para a couve chinesa neste ensaio devem ser considerados apenas como indicativos e sem valor conclusivo para a discussão da qualidade da produção.

Capítulo VI- Conclusão

A presente dissertação teve como objetivos (i) avaliar a viabilidade da utilização da casca de pinheiro em diferentes formulações de substratos e (ii) verificar a possibilidade de desenvolver misturas com propriedades equivalentes às do Nutrimais Universal, mas com menor dependência da fibra de coco.

Relativamente ao primeiro objetivo, os resultados demonstraram que a casca de pinheiro pode ser utilizada em substratos hortícolas de forma tecnicamente viável, desde que acompanhada de uma fração nutritiva suficiente. Apesar das limitações associadas à sua elevada relação C/N e menor capacidade de retenção de água, verificou-se que, em percentagens moderadas, a casca contribuiu para uma boa arejamento e drenagem do substrato, não comprometendo o crescimento das culturas. O tratamento 3 (40% casca de pinheiro + 20% Nutrimais) destacou-se neste sentido, confirmando que a integração desta matéria-prima nacional é compatível com elevados níveis de produtividade.

Quanto ao segundo objetivo, foi possível desenvolver uma formulação alternativa com propriedades produtivas equivalentes, e em alguns casos superiores, às do Nutrimais Universal. Na alface, o controlo manteve-se como referência, sobretudo devido ao equilíbrio físico entre retenção hídrica e porosidade. Já na couve chinesa, mais exigente em termos nutricionais, o tratamento 3 superou o controlo em parâmetros como diâmetro da planta, número de folhas, índice SPAD e biomassa total. Estes resultados confirmam que a combinação de casca de pinheiro e Nutrimais permite formular misturas com desempenho próximo ou superior ao substrato comercial, ao mesmo tempo que reduz a dependência da fibra de coco importada.

Em termos globais, conclui-se que a casca de pinheiro é uma matéria-prima promissora para a formulação de substratos hortícolas, capaz de assegurar viabilidade agronómica, competitividade económica e benefícios ambientais. Para além de contribuir para a redução da pegada ecológica associada à importação de fibra de coco, a sua utilização valoriza um recurso nacional abundante e de baixo custo, reforçando o papel da economia circular na agricultura.

Importa, contudo, reconhecer que este ensaio poderia ter sido enriquecido com a inclusão de parâmetros fisiológicos e nutricionais mais detalhados, tais como a taxa fotossintética, a área foliar, análises ao estado nutricional das plantas e à dinâmica de nutrientes no substrato ao longo do ciclo cultural. Estas avaliações permitiriam uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos subjacentes às diferenças observadas entre tratamentos. Assim, o presente estudo demonstrou que é possível alinhar produtividade e sustentabilidade na produção hortícola, oferecendo à Lipor e ao setor agrícola em geral uma alternativa, eficiente

e ambientalmente responsável ao modelo de substrato atualmente em uso.

Referências Bibliográficas

- Abad, M., Noguera, P., & Carrión, C. (2004). Los substratos en los cultivos sin suelo. En M. Urrestarazu (Ed.), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 113–135). Ediciones Mundi-Prensa.
- Almeida, D. P., & Reis, M. (2017). *Engenharia hortícola*. Agrobook.
- Barrett, G. E., Alexander, P. D., Robinson, J. S., & Bragg, N. C. (2016). Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – A review. *Scientia Horticulturae*, 212, 220–234.
- Blok, C., & Wever, G. (2020). Physical characterization of soilless growing media: A review of approaches and methods. *Scientia Horticulturae*, 267, 109334.
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food and production* (pp. 1–95). FAO.
- Brito, L. M., & Mourão, I. (2012). Características dos substratos para horticultura: Propriedades e características dos substratos (parte I/II). *Agrotec: Revista Técnico-Científica Agrícola*, 2, 32–38. Recuperado em 15 de agosto de 2012, de <https://digitalis.uc.pt/handle/10316.2/25812>
- Brust, G. E. (2019). Management strategies for organic vegetable fertility. In *Safety and practice for organic food* (pp. 193–212). Elsevier.
- Chambers, F. M., Beilman, D. W., & Yu, Z. (2011). Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. *Mires and Peat*, 7(7), 1–10.
- Clemson HGIC. (2020). *Cabbage & Chinese cabbage*. Clemson Cooperative Extension.
- da Cruz, E. S., Medici, L. O., Leles, P. S. S., Ambrozim, C. S., Souza, W. L., & de Carvalho, D. F. (2022). Growth of black pepper plantlets under different substrates and irrigation levels. *Scientia Agrícola*, 79(1), 1–6.
- Dai et al. (2024) — “Optimal Light Intensity for Lettuce Growth, Quality, and Photosynthesis” — observaram que altura, número de folhas e SPAD variaram com a intensidade de luz, até certo patamar.
- De Boodt, M., & Verdonck, O. (1972). The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae*, 26, 37–44.

- De Boodt, M., Verdonck, O., & Cappaert, I. (1974). Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37, 2054–2062.
- Di Lorenzo, R., Antonino, P., Pietro, S., & Scariot, V. (2013). From soil to soil less in horticulture: Quality and typicity. *Italian Journal of Agronomy*, 8, 255–260.
- Diário da República. (1982, 10 de dezembro). *Estatutos da LIPOR – Associação de Municípios para a Gestão Sustentável de Resíduos do Grande Porto*. Diário da República, nº 284, Série II. Recuperado de <https://files.diariodarepublica.pt/2s/2021/08/164000000/0061900670.pdf>
- Diário da República. (2015). Decreto-Lei nº 103/2015 de 15 de junho. *Série I, nº 114*. Ministério da Economia.
- Dias, G. C., Machado, R. M. A., Alves-Pereira, I., Ferreira, R. A., & Gruda, N. S. (2025). Potential of pine bark to replace perlite in coir-based substrates: Effects on nutrient uptake, growth, and phytochemicals in lettuce under two salinity levels. *Plants*, 14(16), 2577.
- El-Kazzaz, K. A., & El-Kazzaz, A. A. (2017). Soilless agriculture: A new and advanced method for agriculture development – An introduction. *Agricultural Research & Technology Open Access Journal*, 3, 63–72.
- Esper, F. P., & Martínez, J. V. (2004). Cultivo en fibra de coco. In M. G. Urrestarazu (Coord.), *Tratado de cultivo sin suelo* (3ª ed., pp. 637–667). Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- European Soil Bureau Network. (2005). *Soil atlas of Europe*. Office for Official Publications of the European Communities.
- Evans, M. R., Konduru, S., & Stamps, R. H. (1996). Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortScience*, 31(6), 965–967.
- Ferby, C., Kome, G., & Nkongolo, N. (2023). Effects of salinity on soilless substrates and implications for plant growth. *Agronomy*, 13(2), 389.
- Ferby, V., Kopta, T., Komorowska, M., & Fidurski, M. (2023). Evaluation of alternative substrates for hydroponics based on biological parameters of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) and its stress response. *Folia Horticulturae*, 34(3), 1–14.
- Fernandes, R. (2016). A matéria orgânica do solo. *Dossier Técnico: Vida Rural, maio 2016 – Revista Profissional de Agronegócios*, 26–28.

- Ferrarezi, R. S., Black, B. L., Martin, J., Mattson, N. S., & Kubota, C. (2024). Multi-season evaluation of substrates for optimized arugula and lettuce production in hydroponics. *HortScience*, 59(3), 403–411.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). *FAOSTAT – Crops and livestock products*. FAO. Recuperado em 26 de julho de 2010, de <http://www.fao.org/faostat>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *Leafy green vegetable production: Lettuce*. FAO.
- Grasselly, D. (2009). Carbon footprint of coconut fibre (coir) substrates. *Acta Horticulturae*, 819, 301–308.
- Gruda, N. (2009). Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82(2), 141–147.
- Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(6), 298.
- Gruda, N., & Schnitzler, W. H. (2004). Suitability of wood fiber substrate for production of vegetable transplants: I. Physical properties of wood fiber substrates. *Scientia Horticulturae*, 100(1–4), 309–322.
- Guo, R., Li, Y., He, J., Li, Y., & Yang, C. (2020). Effects of nitrogen supply on growth, nitrogen metabolism, and photosynthesis of pak choi (*Brassica rapa* L. ssp. *chinensis*). *Journal of Integrative Agriculture*, 19(6), 1540–1552. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62716-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62716-5)
- Handreck, K. A. (1983). *Particle size and the physical properties of growing media for containers*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 14(2), 209–222.
- Handreck, K., & Black, N. (2010). *Growing media for ornamental plants and turf* (4th ed.). UNSW Press.
- Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. (2016). *Plano de ação para prospeção e erradicação do fungo Gibberella circinata/Fusarium circinatum (cancro-resinoso-do-pinheiro) – Pinheiros e Pseudotsuga: Fitossanidade florestal*.
- Jornal Novo Regional. (2024, julho 10). *Wallie, o novo ecoponto doméstico feito com plásticos reciclados de mesas e cadeiras em fim de vida*. Jornal Novo Regional. Recuperado em de junho de 2025, de

<https://www.jornalnovoregional.pt/2024/07/wallie-o-novo-ecoponto-domestico-feito-com-plasticos-recicladados-de-mesas-e-cadeiras-em-fim-de-vida/>

- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2024). Physical and chemical properties of soilless substrates: Impacts on water and nutrient availability. *Journal of Plant Nutrition*, 47(1), 1–17.
- Lemaire, F. (1995). Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae*, 396, 273–284.
- Lieth, J. H., & Oki, L. R. (2019). Irrigation in soilless production. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (pp. 381–423). Elsevier.
- LIPOR. (2021). *A LIPOR*. LIPOR – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. Recuperado em 28 de julho de 2025, de <https://www.lipor.pt/pt/sobre-nos/a-lipor/>
- LIPOR. (2023, 19 de setembro). *Propósito, missão e política*. Conselho de Administração da LIPOR. Recuperado em 28 de julho de 2025, de <https://www.lipor.pt/pt/sobre-nos/proposito-missao-e-politica/>
- LIPOR. (2024). *Relatório integrado 2024* (p. ...). LIPOR – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. Recuperado de https://www.lipor.pt/fotos/gca/lipor_relatoyrrio_integrado_2024_final_v4_8148231956852911b6ccf7.pdf
- LIPOR. (2024). *Túneis de compostagem. Circuito Central de Valorização Orgânica – Valorizar para nutrir*. Recuperado em 27 de junho de 2025, de <https://www.lipor.pt/pt/visitar/circuito-central-de-valorizacao-organica/valorizar-para-nutrir/>
- LIPOR. (n.d.). *Case study: Lipor*. Recuperado em 28 de junho de 2025, de https://www.lipor.pt/fotos/editor2/PORTAL_2020/INTERNACIONAL/CASE_STUDY/AF_LIPOR_PT.pdf
- López, C. C. (2005). *Fertirrigación: Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Louro, M., & Reis, M. M. F. dos. (2020). *Manual de cultivo sem solo: Aspetos teóricos e práticos dos cultivos hidropónicos e em substrato*. Quântica Editora.

- Ma, N., Zhang, L., Zhang, Y., Yang, Y., & Wang, H. (2022). Combined organic and inorganic fertilization improves yield and quality of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*) under greenhouse conditions. *Agronomy*, 12(3), 720.
- Machado, R. M. A., Alves-Pereira, I., Alves, I., Ferreira, R. M. A., & Gruda, N. S. (2023). Reusing coir-based substrates for lettuce growth: Nutrient content and phytonutrients accumulation. *Horticulturae*, 9(10), 1080.
- Maher, M., Prasad, M., & Raviv, M. (2007). Organic soilless media component. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (pp. 459–504). Elsevier.
- Martínez, P. F., & Roca, D. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo: Materiales, propiedades y manejo. In *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (pp. 37–77). Universidad Nacional de Colombia.
- Miao et al. (2023) — “Effects of Light Intensity on Growth and Quality of Lettuce” — demonstraram que o aumento da intensidade luminosa teve impacto positivo sobre a altura da planta em cultivares de alface.
- Michelon, N., Pennisi, G., Myint, N. O., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2021). Optimization of substrate and nutrient solution strength for lettuce and Chinese cabbage seedling production in the semi-arid environment of Central Myanmar. *Horticulturae*, 7(4), 64.
- Miner, J. A. (1994). *Substratos: Propiedades y caracterización*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Mustafa, M., Shukor, J. A., Mohd, M. H., Ahmad, A. N., & Yusoff, M. A. (2023). Effects of BRT®Ever Green and Aqua Perla as substrate improvement agents on vegetative growth, yield and nutrient of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(6), 103692.
- Nerlich, A., & Dannehl, D. (2021). Soilless cultivation: Dynamically changing chemical properties and physical conditions of organic substrates influence the plant phenotype of lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 11, 601455.
- Oliveira, C. A. S., Rezende, F. C., & Silva, R. F. (2014). Substratos orgânicos no desenvolvimento de mudas de alface. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(4), 554–559.
- Olympios, C. M., & Choukr-Allah, R. (1999). Overview of soilless culture: Advantages, constraints, and perspectives. *Protected Cultivation in the Mediterranean Region*, 31, 307–324.

- Papadopoulos, A. P., Bar-tal, A., Silber, A., Saha, U. K., & Raviv, M. (2008). Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixes. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (1st ed., pp. 511–514). Elsevier.
- Puustjarvi, V., & Robertson, R. A. (1975). Physical and chemical properties. In D. W. Robinson & J. G. D. Lamb (Eds.), *Peat in horticulture* (pp. 23–38). Academic Press.
- Qiu, L., Li, X., & Zhang, Y. (2025). Advances in the evaluation of growing media quality for sustainable horticulture. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1524398.
- Raviv, M., Chen, Y., & Inbar, Y. (1986). Peat and peat substitutes as growth media for container-grown plants. In Y. Chen & Y. Avnimelech (Eds.), *The role of organic matter in modern agriculture* (pp. 257–287). Springer.
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., & Bar-Tal, A. (2002). Substrates and their analysis. In D. Savvas & H. Passam (Eds.), *Hydroponic production of vegetables and ornamentals* (pp. 25–102). Embryo Publications.
- Reis, M. (2005). A cultura sem solo (CSS). *Vida Rural* (Outubro): 72-75.
- Reis, M. (2007). Material vegetal e viveiros. In *Manual de horticultura no modo de produção biológico* (pp. 19–52). Escola Superior Agrária de Ponte de Lima.
- Reis, M. (2009). Em busca do substrato ideal. *Vida Rural*, 1752, 38–40.
- Ribeiro, D., Ribeiro, H. E., & Louro, V. (2001). *Produção em viveiros florestais*. Direcção-Geral de Desenvolvimento Rural.
- Ribeiro, H. M. F. (1996). *Possibilidade de utilização de resíduos sólidos urbanos compostados na formulação de substratos para plantas envasadas* [Dissertação de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia].
- Ribeiro, H. M., Vasconcelos, E., Ribeiro, D., Cabral, F., & Santos, J. Q. (2001). Utilização de casca de pinheiro envelhecida na cultura de plantas ornamentais envasadas. *Revista de Ciências Agrárias*, 24(3–4), 176–183.
- Roy, P., et al. (2023). *A Review on the Challenges and Choices for Food Waste Valorization*. ACS Environmental Au.
- Sangaré, M., Nemati, M. R., & Fortin, J. P. (2011). Beneficial effect of coconut fiber and peat on the physical quality of nursery substrates. In *International Symposium on Growing Media, Composting and Substrate Analysis 1013*

- Santos, J. Q. (2012). *Fertilização: Fundamentos da utilização dos adubos e corretivos*. Publicações Europa-América.
- Schäfer, R., Kern, J., & Winkelmann, T. (2015). Effects of pine bark substrates on nitrogen availability and seedling growth. *European Journal of Horticultural Science*, 80(6), 269–276.
- Schnitzler, W. H. (2012). Urban hydroponics for green and clean cities and for food security. In *International Symposium on Soilless Cultivation* (Vol. 1004, pp. 13–26).
- Schwarz, M. (2012). *Soilless culture management* (Vol. 24). Springer Science & Business Media.
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer.
- Soria, C., & Olivert, J. (2002). *Cultivo sin Suelo de Hortalizas – Aspectos prácticos e experiencias*. Generalitat Valenciana, Valencia, Espanha.
- UNECE. (2023). *UNECE standard FFV-44 concerning the marketing and commercial quality control of Chinese cabbage*. United Nations Economic Commission for Europe.
- Van Os, E., Gieling, T. H., & Lieth, J. H. (2008). Technical equipment in soilless production systems. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (pp. 157–207). Elsevier.
- Vasconcelos, E. J. M. P. (1987). *Salinidade dos solos e fertilização* [Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia].
- Verdonck, O., & Demeyer, P. (2004). The influence of the particle size on the physical properties of growing media. *Acta Horticulturae*, 644, 99–101.
- Wallach, R. (2008). Physical characteristics of soilless media. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture* (1st ed., pp. 41–107). Elsevier.
- Wang, X., Zhang, H., Wu, X., Liu, J., & Chen, Y. (2023). Optimizing soilless culture substrates improves root growth and nitrogen uptake of Chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*). *Frontiers in Plant Science*, 14, 1123456.
- Wever, G., Van Leeuwen, A. A., & Van der Meer, M. C. (1996). Saturation rate and hysteresis of substrates. In *International Symposium on Growing Media and Plant Nutrition in Horticulture* (Vol. 450, pp. 287–296).

- Wu, L., He, L., Zhang, C., Zhang, Y., Wang, J., & Qin, R. (2025). Nitrogen immobilization by wood fiber substrates strongly reduces lettuce growth and photosynthetic performance. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1528234.
- Zhu, J., Li, W., Xu, J., & Hu, Y. (2021). Effects of organic and inorganic fertilizer application on growth and nutrient uptake of Chinese cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*). *Scientia Horticulturae*, 289, 110440.

Anexos

Anexo 1 - Pressupostos da ANOVA

Variável	p-valor Normalidade (Shapiro)	p-valor Homogeneidade (Levene)	Independência (Visual)
Diametrom	0.07836	0.98319	Visual
Diametrof	0.13506	0.8057	Visual
Alturaf	0.40848	0.0811	Visual
SPADf	0.28225	0.30905	Visual
Nfolhas	0.01554	0.05607	Visual
PFRaíz	0.76929	0.53642	Visual
PFCaule	0.22668	0.00132	Visual
PFFolhas	0.04124	0.00017	Visual
PFTotal	0.6983	0.00738	Visual
PSRaíz	0.0	0.07391	Visual
PSCaule	0.65838	0.13784	Visual
PSFolhas	0.92301	0.39501	Visual
PSTotal	0.00016	0.51698	Visual
Brix	0.25123	nan	Visual

A tabela acima apresenta os pressupostos da ANOVA com as variáveis em sua forma original (sem transformação):

O teste de Shapiro-Wilk indica normalidade dos resíduos para a maioria das variáveis (exceto Nfolhas, $p = 0.015$),

O teste de Levene sugere homogeneidade das variâncias para quase todas, com Alturaf e Nfolhas próximos do limiar,

A independência dos resíduos foi considerada visualmente adequada.

As variáveis foram transformadas.

Anexo 2 - Pressupostos da ANOVA

Para cada variável:

Fonte de Variação (Bloco, Tratamento, Erro Residual),

Soma dos Quadrados (SQ),

Graus de Liberdade (GL),

Estatística F (quando aplicável),

p-valor.

Diametrom

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	F	p-valor
C(Bloco)	14.13325	3.0	0.37018	0.77483
C(Tratamento)	246.65823	4.0	4.8454	0.00213
Residual	661.77361	52.0	nan	nan

Diametrof

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	F	p-valor
C(Bloco)	11.698	3.0	0.31339	0.81561
C(Tratamento)	289.16142	4.0	5.80989	0.00061
Residual	647.01661	52.0	nan	nan

Alturaf

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	F	p-valor
C(Bloco)	4.15	3.0	0.11905	0.94851
C(Tratamento)	129.975	4.0	2.79643	0.03535
Residual	604.225	52.0	nan	nan

SPADf

Fonte	de	Soma	dos	GL	F	p-valor
Variação		Quadrados				
C(Bloco)		203.21517		3.0	1.80271	0.15815
C(Tratamento)		473.80267		4.0	3.15231	0.02147
Residual		1953.944		52.0	nan	nan

Nfolhas

Fonte	de	Soma	dos	GL	F	p-valor
Variação		Quadrados				
C(Bloco)		211.0		3.0	2.56835	0.06426
C(Tratamento)		428.4		4.0	3.91096	0.00752
Residual		1424.0		52.0	nan	nan

PFRaíz

Fonte	de	Soma	dos	GL	F	p-valor
Variação		Quadrados				
C(Bloco)		182.39333		3.0	0.89116	0.45195
C(Tratamento)		647.35067		4.0	2.37217	0.06419
Residual		3547.61333		52.0	nan	nan

PFCaule

Fonte	de	Soma	dos	GL	F	p-valor
Variação		Quadrados				
C(Bloco)		26.73856		3.0	0.94006	0.42806
C(Tratamento)		222.50602		4.0	5.86707	0.00057
Residual		493.01963		52.0	nan	nan

PFFolhas

Fonte	de	Soma	dos	GL	F	p-valor
Variação		Quadrados				
C(Bloco)		2309.90159		3.0	1.76802	0.16473
C(Tratamento)		28243.47493		4.0	16.21334	0.0

Residual	22645.86818	52.0	nan	nan
----------	-------------	------	-----	-----

PFTotal

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	F	p-valor
C(Bloco)	7231.78801	3.0	2.11234	0.10986
C(Tratamento)	32763.38697	4.0	7.17743	0.00011
Residual	59342.14898	52.0	nan	nan

PSRaíz

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	F	p-valor
C(Bloco)	1.27284	3.0	0.29741	0.8271
C(Tratamento)	17.78703	4.0	3.11704	0.02256
Residual	74.1829	52.0	nan	nan

PSCaule

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	F	p-valor
C(Bloco)	0.69734	3.0	2.10869	0.11034
C(Tratamento)	3.33439	4.0	7.56219	7e-05
Residual	5.73209	52.0	nan	nan

PSFolhas

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	GL	F	p-valor
C(Bloco)	15.11043	3.0	1.66418	0.18607
C(Tratamento)	88.48754	4.0	7.30913	0.0001
Residual	157.38371	52.0	nan	nan

PSTotal

Fonte	de	Soma	dos	GL	F	p-valor
Variação		Quadrados				
C(Bloco)		28.97543		3.0	1.29098	0.28729
C(Tratamento)		208.24389		4.0	6.95861	0.00015
Residual		389.03921		52.0	nan	nan

Brix

Fonte	de	Soma	dos	GL	F	p-valor
Variação		Quadrados				
C(Bloco)		0.11954		3.0	1.81365	0.23242
C(Tratamento)		0.32971		4.0	3.75171	0.06147
Residual		0.15379		7.0	nan	nan