



Mestrado em Tecnologia Ambiental

**Avaliação de Soluções de Base Natural na fixação
de Carbono de plantas jovens de Medronheiro
(*Arbutus unedo L.*)**

Sónia Lima dos Ramos Penhor

Orientada por: Professora Dra. Zulimar Hernández

Bragança

2025

Sónia Lima dos Ramos Penhor

**Avaliação de Soluções de Base Natural na fixação
de Carbono de plantas jovens de Medronheiro
(*Arbutus unedo L.*)**

Dissertação a apresentar à Escola Superior Agrária de Bragança para
obtenção de grau de mestre em Tecnologia Ambiental, sem sugestão
do júri

Orientadora: Professora Dra. Zulimar Hernández

Bragança

2025

Agradecimentos

Durante a minha trajetória no Instituto Politécnico de Bragança, muitas foram as experiências que colhi, que contribuíram para crescer e aprender com as barreiras. Conheci e convivi com várias pessoas que se tornaram amigas e conquistaram a minha admiração.

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, perseverança e pela oportunidade de crescer intelectual e profissionalmente.

À toda a minha família, a quem devo tudo o que sou hoje. Muito obrigada pela confiança que depositaram em mim.

À minha orientadora, a professora Zulimar Hernández, pelo carinho, disponibilidade, paciência, ensinamentos e confiança demonstrada na realização deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Solos e CIMO, pelo apoio e pela disponibilidade prestados na realização das práticas laboratoriais.

A todos os que, direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Resumo

Este trabalho visa quantificar a fixação de carbono (CO₂) em plantas jovens de Medronheiro (*Arbutus unedo L.*) utilizando Soluções baseadas na Natureza (SbN). As SbN surgem como alternativas sustentáveis para restaurar ecossistemas degradados, promovendo o sequestro de C e a recuperação dos ecossistemas. O estudo foca num condicionador de solo (MC), elaborado com composto de bagaço de azeitona, um dos principais subprodutos da fileira olivícola, como principal SbN, em comparação com um substrato comercial (MS) e areia (MT). O delineamento experimental inclui, por um lado, um ensaio de germinação e crescimento de plântulas-planta (durante o primeiro ano) em estufa (T^a e água controladas), e por outro lado, um ensaio em condições de campo (área reflorestada) para avaliar a sobrevivência das plantas jovens de Medronheiro. A área de estudo reflorestada corresponde com uma zona afetada pelo grande incêndio de Picões nos Lagos do Sabor, Mogadouro. A taxa de germinação foi de 44% em MC e 37% em MS, observando-se alta mortalidade em MT. A taxa de crescimento das plântulas em altura foi de 0,6 mm/dia para o MC e MS e em número de folhas foi superior em MC (0,08 folhas/dia) e em MS (0,06 folhas/dia); biomassa acumulada foi de 2,69 e 3,26 g/planta para MC e MS, respetivamente. O MC apresentou maior biomassa em folhas (57%) e MS em talos (37%), o que indica diferentes estratégias de sobrevivência. A monitorização permitiu estabelecer uma equação exponencial de crescimento e alométrica nesta espécie, assim como analisar o efeito da SbN no desenvolvimento. Em campo, foi evidenciada uma queda acentuada na taxa de vitalidade de 50% (antes de verão) para 19% (depois de verão) e um aumento expressivo da mortalidade (42%), dependente da localização da parcela florestal. Os dados obtidos permitiram calcular a taxa de fixação de CO₂ em plantas jovens de Medronheiro em 2,96 e 3,59 kg CO₂/ha/ano para MC e MS, respetivamente. Por último, foi desenvolvido um modelo dinâmico para descrever o crescimento desta espécie florestal, com diferentes fatores abióticos.

Palavras-chave: SbN, reflorestação, plantas mediterrânicas, germinação, taxa de crescimento absoluto.

Abstract

This work aims to quantify carbon (CO₂) fixation in young strawberry tree (*Arbutus unedo* L.) plants using Nature-based Solutions (NbS). NbS emerge as sustainable alternatives to restore degraded ecosystems, promoting C sequestration and ecosystem recovery. The study focuses on a soil conditioner (MC), made with olive pomace compost, one of the main by-products of the olive growing sector, as the main NbS, in comparison with a commercial substrate (MS) and sand (MT). The experimental design includes, on the one hand, a germination and seedling growth trial (during the first year) in a greenhouse (controlled temperature and water), and on the other hand, a trial under field conditions (reforested area) to evaluate the survival of young strawberry tree plants. The reforested study area corresponds to an area affected by the large Picões fire in Lagos do Sabor, Mogadouro. The germination rate was 44% in MC and 37% in MS, with high mortality observed in MT. The seedling growth rate in height was 0.6 mm/day for MC and MS, and the number of leaves was higher in MC (0.08 leaves/day) and MS (0.06 leaves/day); accumulated biomass was 2.69 and 3.26 g/plant for MC and MS, respectively. MC showed greater biomass in leaves (57%) and MS in stems (37%), indicating different survival strategies. Monitoring allowed the establishment of an exponential and allometric growth equation for this species, as well as the analysis of the effect of SbN on development. In the field, a sharp drop in the vitality rate from 50% (before summer) to 19% (after summer) and a significant increase in mortality (42%) were observed, depending on the location of the forest plot. The data obtained allowed the calculation of the CO₂ fixation rate in young strawberry tree plants at 2.96 and 3.59 kg CO₂/ha/year for MC and MS, respectively. Finally, a dynamic model was developed to describe the growth of this forest species under different abiotic factors.

Keywords: SbN, reforestation, mediterranean plants, germination, absolute growth rate.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	2
2. Revisão da literatura.....	3
2.1. O ciclo de carbono.....	3
2.2. Contributo das florestas ao Inventário Nacional de Emissões	4
2.3. Espécie florestal: O Medronheiro.....	6
2.4. As Soluções de base Natural (SbN).....	8
2.5. Tipo de SbN: Corretivos orgânicos	9
2.5.1. Corretivos orgânicos do solo (tipo composto).....	9
2.6. Problemas de degradação do solo – Impacto do incêndio de Picões	11
3. Metodologia	12
3.1. Área de estudo	12
3.2. Taxa de germinação do Medronheiro.....	13
3.3. Taxa de crescimento de plântulas de Medronheiro	14
3.4. Preparação das amostras de folhas do Medronheiro para análise de nutrientes.....	17
3.5. Modelação do crescimento de Medronheiro	18
3.6. Monitorização de nível de vitalidade em campo de plantas de Medronheiro	19
4. Resultados e discussão	20
4.1. Taxa de germinação do Medronheiro.....	20
4.2. Taxa de crescimento de plântulas de Medronheiro com SbN.....	23
4.3. Análise dos dados da biomassa	28
4.4. Taxa de fixação de CO ₂	31
4.5. Nutrientes	32
4.6. Modelação do crescimento de Medronheiro	33
4.6.1. Fase calibração do modelo	35
4.6.2. Fase projeção do modelo	39

4.7. Monitorização de nível de vitalidade do Medronheiro em campo	41
5. Conclusões	49
6. Referências bibliográficas	51
ANEXOS.....	61

Índice de figuras

Figura 1: Germinação das sementes de Medronheiro em 3 tratamentos: a) SbN-composto (MC) b) Substrato comercial (MS) c) Testemunha (MT).....	14
Figura 2: Plântulas de Medronheiro após seis meses (a), e plantas depois dum ano na estufa (b).....	15
Figura 3: Colheita integral das plantas de Medronheiro, incluindo o sistema radicular, (a) e planta limpa para posterior análise de biomassa (b).....	16
Figura 4: Planta de Medronheiro separada em fração aérea (talo e folhas) e subterrânea (lignotuber e raízes) (a) e devidamente identificada (b)	16
Figura 5: Biomassa fresca – parte aérea (a) e biomassa seca - folhas (b) duma planta de medronheiro; dados obtidos em balança de precisão.....	17
Figura 6: Procedimento de preparação de amostras: Folhas no triturador mecânico (a), folhas moídas no almofariz (b) e separação final com crivo de 106 µm (c).....	18
Figura 7: Taxa de germinação (%) das sementes da Medronheiro por tratamento: MT - testemunha, MC – composto BA e MS - substrato comercial (teste ANOVA, p-valor <0,05, onde as letras minúsculas indicam quais grupos têm médias significativamente diferentes entre si, a um nível de confiança de 95%)	21
Figura 8: Número de sementes germinadas por tratamento (MT, MC e MS) ao longo do tempo (20, 28, 44 e 48 dds)	22
Figura 9: Taxa de crescimento em plantas de Medronheiro (estágio plântula a planta), sujeitas a 3 tratamentos (MT, MC e MS) em condições controladas (T ^a , humidade); expressada em altura média das plantas durante 365 dias (Equações: funções exponenciais).....	24
Figura 10: Taxa de crescimento em plantas de Medronheiro (estágio plântula a planta), sujeitas a 3 tratamentos (MT, MC e MS) em condições controladas (T ^a , humidade); expressada na média de número de folhas das plantas durante 365 dias (Equações: funções exponenciais).....	25

Figura 11: Relação alométrica entre as variáveis morfológicas altura e número de folhas em plantas de Medronheiro em diferentes períodos de crescimento (140, 187, 277, 370 dds), e em condições controladas. (Equações: funções lineares)	26
Figura 12: Relação alométrica média entre as variáveis morfológicas altura e número de folhas em plantas de Medronheiro em 365 dds e condições controladas de crescimento.....	27
Figura 13: Gráficos Box-and-Whisker Plot da biomassa total (massa seca) das plantas de Medronheiro depois de 365 dias, sujeitos a dois tratamentos (MS-substrato e MC-composto), em condições controladas. (Teste ANOVA, p valor > 0,05)	28
Figura 14: Gráficos Box-and-Whisker Plot das variáveis: a) conteúdo de água (esquerda) e b) eficiência do uso de água (direita) das plantas de Medronheiro depois de 365 dias, sujeitos a dois tratamentos (MS-substrato e MC-composto), em condições controladas. (Teste ANOVA, p valor < 0,05)	29
Figura 15: Gráficos Box-and-Whisker Plot das variáveis de biomassa: folhas, raízes e talo dos das plantas de Medronheiro depois de 365 dias, sujeitos a dois tratamentos (MS e MC), em condições controladas. (Teste ANOVA, p valor < 0,05)	30
Figura 16: Gráficos Box-and-Whisker Plot das variáveis de biomassa assimilatória e não assimilatória das plantas de Medronheiro depois de 365 dias, sujeitos a dois tratamentos (MS e MC), em condições controladas. (Teste ANOVA, p valor < 0,05)	31
Figura 17: a) Valores médios dos macronutrientes (em %) em plantas de Medronheiro do tratamento MS, em comparação com b) os valores do tratamento MC.....	33
Figura 18: a) Valores médios (em %) dos micronutrientes em plantas de Medronheiro do tratamento MS, em comparação com b) os valores do tratamento MC.....	33
Figura 19: a) Modelo de crescimento do Medronheiro em função da altura para o MC b) Modelo de crescimento do Medronheiro em função da altura para o MS.....	34
Figura 20: a) Modelo de crescimento do Medronheiro em função de número de folhas para o MC b) Modelo de crescimento do Medronheiro em função de número de folhas para o MS.....	34
Figura 21: Resultado de altura do tratamento MC no intervalo de 140 a 365 dias, em relação à taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.....	35

Figura 22: Resultado de altura no tratamento MS no intervalo de 140 a 365 dias, em relação à taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.....	35
Figura 23: Resultado de número de folhas do tratamento MC num intervalo de tempo de 41 a 370 dias, em relação à taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.....	36
Figura 24: Resultado de número de folhas do Tratamento MS no intervalo de 41 a 370 dias, em relação à taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.....	36
Figura 25: Resultados da relação entre a altura das plantas e a fixação de CO ₂ do tratamento MC entre 140 e 365 dias.....	37
Figura 26: Resultados da relação entre a altura das plantas e a fixação de CO ₂ do tratamento MS entre 140 e 365 dias.....	37
Figura 27: Resultado da relação entre Número de folhas e biomassa do tratamento MC entre 41 e 370 dias.....	38
Figura 28: Resultado da relação entre Número de folhas e biomassa do tratamento MS entre 41 e 370 dias.....	38
Figura 29: Projeção da altura das plantas no tratamento MC entre 140 e 497 dias, em função da taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.....	40
Figura 30: Projeção da altura das plantas no tratamento MS entre 140 e 497 dias, em função da taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.....	40
Figura 31: Projeção de número de folhas do tratamento MC entre 41 e 502 dias, em função da taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.....	41
Figura 32: Projeção de número de folhas do tratamento MS entre 41 e 502 dias, em função da taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.....	41
Figura 33: Fotografias das plantas jovens de Medronheiro (reflorestação em Lagos de Sabor, 2023-24) com diferentes níveis de vitalidade: a) planta com vitalidade moderada (50% das folhas verdes) b) planta com vitalidade elevada (75%) c) e planta totalmente viva (100%)	42

Figura 34: Nível de vitalidade de plantas jovens de Medronheiro antes e depois de verão de 2024 em Lagos de Sabor, expressada em seis categorias (0, 15, 25, 50, 75 e 100% plantas vivas)	43
Figura 35: Nível de vitalidade de plantas jovens de Medronheiro em diferentes parcelas antes e depois de verão de 2024 em Lagos de Sabor, expressada em seis categorias (NV=0, 15, 25, 50, 75 e 100% plantas vivas) por parcela (2-6).	44
Figura 36: Nível de vitalidade de plantas jovens de Medronheiro em diferentes parcelas (2024) em Lagos de Sabor, expressada em valores médios de NV (%) por parcela (indicadas de 2 – 6).....	45
Figura 37: Valores médios de altura das plantas (em centímetros) por parcela (indicadas de 2 - 6) em plantas jovens de Medronheiro plantadas em 2024 em Lagos de Sabor.	45
Figura 38: Valores médios da altura (em centímetros) de plantas jovens de Medronheiro antes e depois de verão de 2024 em Lagos de Sabor, ordenados por diferentes níveis de vitalidade (0, 15, 25, 50, 75 e 100% plantas vivas)	46

Índice de tabelas

Tabela 1– Valores médios de Taxa de Fixação de CO ₂ por planta e hectare de Medronheiro (obtidos a partir dos dados de Biomassa (p.s.))	32
Tabela 2 – Valores médios dos macronutrientes expressos em g/Kg e micronutrientes expressos em mg/Kg em plantas de Medronheiro nos dois tratamentos (MS e MC), expressos em mg/Kg.....	32

Abreviaturas e Acrónimos

BA - Bagaço de azeitona

C - Carbono

CO₂ - Dióxido de carbono

COS - Carbono orgânico no solo

dds – Dias depois da sementeira

GEE - Gases com efeito de estufa

LULUCF – Uso do Solo, Alteração do Uso do Solo e Florestas

MC – Tratamento com composto orgânico a base de BA como SbN

MDL – Mecanismo de desenvolvimento limpo

MS – Tratamento com substrato comercial

MT – Tratamento com areia, sem solução nutritiva, como testemunha.

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

SBN - Soluções baseadas na Natureza

SC - composto orgânico a base de BA como SbN

SS - substrato comercial

ST - Areia (testemunha)

UICN - União Internacional para a Conservação da Natureza

1. Introdução

As Soluções baseadas na Natureza (SbN) surgiram no final da década de 2000, quando a União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN) e o Banco Mundial estavam à procura de soluções naturais, e de baixo custo económico, para dar respostas como ferramentas para mitigação e a adaptação das mudanças climáticas. A UICN define as SbN como "*Ações para proteger, gerir e restaurar ecossistemas naturais ou modificados de forma sustentável de modo que respondam aos desafios que a sociedade enfrenta, proporcionando assim benefícios para o bem-estar humano e a biodiversidade*" (UICN, 2016).

Desde então, o conceito de SbN tem sido adotado pela Comissão Europeia como uma alternativa para lidar com os desafios ambientais e sociais, desempenhando um papel fundamental na adaptação às mudanças climáticas (Fraga & Sayago, 2020; UICN, 2016). Além de contribuírem para a fixação de carbono (C) através de práticas de conservação do solo e água, como a reflorestação ou restauração ecológica, a utilização de áreas de preservação e zonas verdes, a agricultura sustentável e a recuperação das áreas degradadas, as SbN visam também restaurar ecossistemas, promover a biodiversidade, aumentar a resiliência climática e gerar benefícios sociais e económicos (Marques et al., 2021).

Neste sentido, as SbN podem ser utilizadas para melhorar o sucesso de ações de reflorestação ou de restauração ecológica, tendo em conta a baixa taxa de sobrevivência que grande parte das plantas florestais têm em regiões mediterrânicas e terras degradadas, onde a produtividade do solo e, principalmente, a disponibilidade de água no solo é muito baixa (Vallejo et al., 2012). Embora o aumento de fixação de C seja um dos resultados relevantes destas intervenções, importa salientar que as SbN não se limitam a este objetivo. Tal como referido anteriormente, estas abordagens enquadram a reflorestação como parte de um conjunto de estratégias ecológicas e socioambientais, contribuindo simultaneamente para metas ligadas à sustentabilidade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): em especial o ODS 15, de modo a *Proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, travar e reverter a degradação dos solos e travar a perda de biodiversidade* e ODS 13, de modo a *Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos* (ODS, 2022).

Entre as diferentes SbN que podem ser utilizadas para a reflorestação ou restauração ecológica, destaca-se o uso de corretivos orgânicos do solo, tipo composto, que possam apresentar capacidade bioestimulante, ou seja, ser capazes de estimular o crescimento das plantas e ainda sua resiliência nas condições de seca (EBIC, 2025). Além disso, conforme Oliveira et al. (2024), a compostagem enquadra-se no conceito de SbN, visto que é um processo baseado na decomposição biológica que resulta na formação de composto, promovendo regeneração do solo, aumento de matéria orgânica e redução de resíduos orgânicos descartados no ambiente.

Entre as várias espécies florestais utilizadas nos programas nacionais de restauro ou reflorestação em ambiente mediterrânico, além de Sobreiro (*Quercus suber*) ou Azinheira (*Quercus ilex ssp. rotundifolia*), encontramos o Medronheiro (*Arbutus unedo L.*); sendo esta última uma planta arbustiva de amplo espectro, que tolera condições climáticas secas, classificada como pouco inflamável e cresce em solos pobres (Pereira, 2014; Lioudakis & Kakardakis, 2008).

Embora possui grande valor ecológico, existe pouca informação sobre sua taxa de sobrevivência e seu aporte de biomassa para a floresta de folhosas perenifólias, que representa 1/3 da floresta nacional (ICNF, 2019), assim como a sua contribuição como sumidouro de C para o Inventário Nacional de Emissões (NIR, 2023).

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito das SbN na taxa de germinação e crescimento, nomeadamente na produção de biomassa e fixação de C, em plantas jovens de Medronheiro (*Arbutus unedo L.*).

Como objetivos específicos, apresenta-se:

- Avaliar o efeito das SbN da taxa de germinação e crescimento de plantas jovens de Medronheiro em condições controladas (estufa de IPB).
- Avaliar o efeito bioestimulante de um corretivo orgânico (SbN-composto), obtido a partir de um subproduto agroindustrial (bagaço de azeitona), na taxa de germinação, crescimento (altura, número de folhas e biomassa) e na utilização de nutrientes num período de crescimento de um ano (2024–2025).
- Desenvolver um modelo de crescimento em plantas jovens de Medronheiro, com recurso ao software STELLA que utiliza equações diferenciais, de modo a representar as

alterações da vegetação ao tratamento com SbN-composto e ao tratamento convencional, bem como simular a quantidade de biomassa produzida e seu impacto na taxa de fixação de CO₂ ao longo do tempo.

- Realizar uma monitorização numa área recentemente reflorestada (2023-2024), sobre solos degradados por incêndios, o que permitirá calcular o nível de vitalidade do Medronheiro em ambientes secos após ações de reflorestação.

A dissertação está organizada da seguinte forma: uma introdução onde também são apresentados os objetivos, uma revisão bibliográfica, uma metodologia da realização e desenvolvimento do trabalho, apresentação e a discussão dos resultados e por fim, uma conclusão.

2. Revisão da literatura

2.1. O ciclo de carbono

Os organismos autotróficos, como as plantas, fixam o dióxido de carbono (CO₂) atmosférico para produzir biomassa (estruturas de C orgânico), a partir do processo bioquímico conhecido como fotossíntese. Os resíduos vegetais ao se decompor, são incorporados ao solo pela fauna que, por conseguinte, fazem a introdução do C no solo devido a ação de microrganismos heterotróficos (Lefèvre et al., 2017). Essa mistura biogeoquímica de resíduos vegetais e microbianos se combina com os minerais de solo, formando os agregados do solo; e essa agregação garante a persistência do C orgânico no solo (COS) por largos períodos (Lützow et al., 2006; Schmidt et al., 2011). De forma paralela, quando os restos vegetais são decompostos por ação de microrganismos, parte do CO₂ volta novamente para a atmosfera; processo bioquímico conhecido como mineralização da matéria orgânica. Por outro lado, a perda de C do sistema ocorre também devido a exsudados radiculares que libertam compostos orgânicos em forma de C orgânico dissolvido e além disso, parte do COS pode ser levado dos solos para rios e oceanos como C orgânico dissolvido ou também como consequência da erosão do solo (Keiluweit et al., 2015). Para além destes mecanismos, as respirações autotróficas e heterotróficas representam um fluxo essencial do ciclo, dado que tanto plantas como microrganismos devolvem CO₂ à atmosfera durante a respiração celular (Ryan & Law, 2005). A respiração do solo constitui um dos maiores fluxos naturais de retorno de C para a atmosfera (Bond-Lamberty & Thomson, 2010).

Os oceanos desempenham um papel fundamental, atuando como importantes sumidouros de C, através do processo, conhecido como bomba biológica, o fitoplâncton remove o CO₂ das águas superficiais e da atmosfera, armazenando-o no fundo oceânico (Falkowski, 2002). O solo representa um reservatório de C orgânico no sistema terrestre (Batjes, 2014). Entretanto, alterações no uso do solo, como desflorestação, conversão de ecossistemas naturais ou práticas agrícolas intensivas, estão associadas as perdas significativas de C armazenado e ao aumento das concentrações atmosféricas de CO₂ (Houghton & Nassikas, 2017). Contudo, estratégias de gestão sustentável do solo, como manutenção de cobertura vegetal, reflorestação, sistemas agroflorestais ou incremento de matéria orgânica, podem reforçar o sequestro de C (Paustian et al., 2016).

A taxa de fixação de C por parte das plantas pode favorecer-se com diversos fatores ambientais, tais como o aumento da temperatura média anual, que aumenta também a taxa de evapotranspiração, e a produtividade da terra que pode favorecer os processos de absorção de nutrientes disponíveis pelas raízes. Assim, as boas práticas de conservação da água e solo podem desempenhar um papel fundamental na sobrevivência (Vallejo et al., 2012) e no aumento da absorção radicular das plantas (Lal, 2004; Zonta et al., 2021).

2.2. Contributo das florestas ao Inventário Nacional de Emissões

No âmbito do Acordo de Paris, os Estados-Membros da União Europeia concordaram em reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 40% até 2030 (em comparação com as emissões de 1990). Atualmente revisto, e com o objetivo de atingir a neutralidade climática até 2050, a Europa decidiu aumentar esta meta para 55% até 2030. Paralelamente, em 2020, o Governo português comprometeu-se a atingir emissões líquidas zero até 2050 e a acelerar uma série de importantes linhas de ação estratégicas para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa a zero.

A principal linha de ação estratégica em Portugal consistiria em aumentar a superfície florestal. A biomassa florestal tem um papel importante no balanço nacional de emissões de gases com efeito de estufa (GEE), sendo um dos ecossistemas mais relevantes como sumidouros de C, juntamente com as zonas húmidas. De acordo com o Inventário Nacional de Emissões (NIR, 2023), as florestas de Portugal representam um papel fundamental no balanço de emissões de GEE. Em 2021, as emissões de GEE em Portugal (excluindo LULUCF – Uso do Solo, Alteração do Uso do Solo e Florestas) totalizaram 56,5 Mt de CO₂ equivalente (CO₂ eq.), representando uma redução de 5,1% face a 1990,

34,8% em relação a 2005 e 2,8% comparado a 2020, valor que se reduz para as 50,5 Mt de CO₂ eq. se considerarmos as remoções (6 Mt CO₂ eq.) conseguidas pelo sector LULUCF (NIR, 2023), o que demonstra a importância do Uso do Solo, nomeadamente das florestas, no cálculo de emissões do NIR.

De acordo com o 6º Inventário Florestal Nacional (2016), os espaços florestais de Portugal ocupam uma superfície de 6,1 milhões de hectares (ICNF, 2019) e de acordo com o Relatório do Inventário Nacional de Emissões de Gases com Efeito de Estufa de 2022 (NIR, 2023), as florestas de Portugal foram responsáveis por um sequestro de C médio anual de 5,58 Mt CO₂ eq. entre 1990 e 2021, valor que se reduz para uma média de 2,84 Mt CO₂ eq. (emissões líquidas) se forem consideradas outras fontes de emissões relacionadas com a floresta, principalmente a queima de biomassa associada aos incêndios. Nesse sentido, o aumento anual de superfície florestal representa um mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) para a redução de emissões de GEE, fornecendo um contributo potencial para o sequestro de C através da expansão da replantação (Motta et al., 2000).

Embora as florestas sejam consideradas o principal MDL, existe pouca informação sobre as taxas de fixação de C das plantas jovens. A capacidade de fixação de C pelas árvores varia conforme fatores como: espécie, taxa de crescimento, longevidade, clima, solo e tipo de floresta. Florestas secundárias e plantações jovens fixam mais C que florestas primárias, devido a taxa de crescimento frequentemente exponencial. Em contraste, florestas primárias e plantações maduras atingem um equilíbrio na fixação de C, pois a quantidade de CO₂ capturada é compensada pela liberação resultante na evapotranspiração e na decomposição da madeira morta e da senescência das árvores (Arevalo et al., 2002). Neste contexto, destaca-se a relevância das espécies mediterrânicas nativas, como o Medronheiro (*Arbutus unedo* L.), frequentemente utilizadas em ações de recuperação ecológica em Portugal. Estudos realizados por Gratani et al. (2013), demonstram que o Medronheiro apresenta elevada eficiência fotossintética, indicando elevado potencial de sequestro de C.

Uma outra linha de ação estratégica para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa a zero centra-se nas possibilidades oferecidas quer pela Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), regulamentada principalmente pelo Decreto-Lei n.º 151-B/2013, quer pela Avaliação Ambiental Estratégica (AAE), regulamentada pelo Decreto-Lei n.º 232/2007, para incorporar medidas de adaptação e mitigação em novos planos e projetos

através do procedimento de avaliação ambiental. Este procedimento constitui um mecanismo eficaz para integrar as alterações climáticas em planos e projetos de grande escala, sujeitos à Avaliação Ambiental obrigatória, tanto em termos de emissões de gases com efeito de estufa durante a sua execução e gestão, como na avaliação da vulnerabilidade aos impactos das alterações climáticas.

Neste contexto, há uma necessidade de quantificar as emissões resultantes da destruição do armazenamento de carbono na vegetação e no solo (sumidouros de carbono) resultante das alterações no uso do solo foi incorporada na AIA. Dado que todas estas emissões diretamente associadas ao projeto devem ser mitigadas com medidas quantitativas e temporárias, preferencialmente com impacto direto no município afetado e nos seus habitantes, surge a obrigação de compensar 100% das emissões de CO₂ geradas pela destruição dos sumidouros de carbono.

Neste sentido, muitos dos estudos de impacto ambiental submetidos à administração pública propõem, entre as medidas compensatórias, a restauração ecológica com espécies nativas da área afetada. Para o seu cálculo é utilizada a metodologia do IPCC (2006), incluída no NIR (Capítulo: Uso da Terra, Alterações no Uso da Terra e Florestas – CRF 4 (LULUCF), onde são publicadas as taxas de fixação de CO₂ para algumas coberturas florestais. Existem alguns estudos das taxas de fixação de C para florestas maduras, mas praticamente não há informação para associações vegetais ou formações jovens em ambientes mediterrâneos, o que podia estar subestimando os valores de emissões de GEE em Portugal.

2.3. Espécie florestal: O Medronheiro

O Medronheiro (*Arbutus unedo L.*) é uma planta perene típica de clima mediterrâneo. Pertence ao género *Arbutus spp.*, família Ericaceae, dentro de Ericales. Cresce na bacia do Mediterrâneo e em regiões com verões quentes e invernos chuvosos e amenos (Celikel et al., 2008). Tem interesse para o restauro ecológico, devido a: i) sua baixa biomassa morta em pé, sendo classificada como pouco inflamável (Liodakis & Kakardakis, 2008), ii) alta capacidade de rebrotar após incêndios, iii) sucessão tardia, cujo “banco de sementes” é frequentemente comprometido por incêndios florestais recorrentes (Mesléard & Lepart, 1991) e, finalmente, uma resistência intermédia à seca, em comparação com outras espécies mediterrânicas (Vasques et al., 2013).

O Medronheiro é considerado uma espécie arbustiva de crescimento lento (Coelho et al., 2017; Pallauf et al., 2008). Ainda que detenha um sistema radicular pouco profundo, apresenta um engrossamento na base do caule, denominado lignotuber, que além de exercer de fonte de novos meristemas, é um importante órgão de armazenamento de hidratos de carbono e nutrientes, que podem ser mobilizados após o fogo, (Canadell e López-Soria, 1998) o que sugere adaptação a seca e fogo (Konstantinidisa et al, 2006). Trata-se de uma planta arbustiva que pode atingir cerca de 7 a 9 metros de altura, podendo em alguns casos chegar aos 12 metros (Özcan & Haciseferoğulları, 2007). Suas folhas persistentes são renovadas normalmente durante a primavera (Coelho et al., 2017). Os frutos possuem formato esféricos, com 2 a 3 cm de diâmetro, são vermelhos e saborosos quando totalmente maduros. Embora comestíveis, os frutos são geralmente processados antes do consumo, como bebidas alcoólicas, geleias, marmeladas e compotas (Pallauf et al., 2008), sendo também utilizado na medicina tradicional devido a suas propriedades antissépticas, antioxidantes, diuréticas e depurativas (Mohammed et al., 2007).

A decomposição das folhas ocorre de forma muito lenta devido a presença de altos teores de fenóis, o que resulta na formação de uma camada pouco espessa de folhas que fortalece a camada superficial do solo, resultando numa estratégia contra a erosão do solo e a perda de água (Coelho et al., 2017).

De acordo com a carta da tipologia florestal de Portugal Continental (2005), a formação medronhal ocupa 0,5% da área florestal de Portugal, o que corresponde a aproximadamente 15.500 hectares, estando incluída dentro duma área maior, de aproximadamente 1 milhão de hectares, ocupada pelas florestas de folhosas perenifólias onde convive com outras formações florestais de sobreiro, carvalho, pinheiro ou matos (ICNF, 2019).

O medronhal distribuiu-se amplamente por todo o país, localizando-se no Norte de Portugal nos concelhos de Armamar e Tarouca, e na Terra Quente do Nordeste Transmontano. No Centro, nos concelhos de Coimbra, Sertã e Oleiros. Em Lisboa e Vale do Tejo, foram identificados núcleos de medronhal nos concelhos de Abrantes, Coruche e Benavente. No Alentejo, é encontrado na transição entre os concelhos de Sines e Santiago do Cacém. Destaca-se que 35% do medronhal está concentrado na confluência dos concelhos de Almodôvar, Silves e Loulé (Godinho-Ferreira et al., 2005).

Após os incêndios, o medronhal mostra uma forte capacidade de rebrotar, criando rapidamente uma cobertura vegetal, ajudando a proteger o solo da erosão e facilita a recuperação de outras espécies da floresta (Duarte et al., 2009). A sobrevivência após incêndios está relacionada com a sua capacidade de reiniciar o crescimento vegetativo a partir de lignotúberes pré-existentes (Konstantinidis et al., 2006).

No entanto, apesar da sua capacidade de adaptação a ambientes secos e agrestes, há poucos estudos que abordem a taxa de sobrevivência e crescimento da espécie, sendo que a maioria dos estudos indicam que a taxa de crescimento das espécies é um processo complexo e lento, influenciado por fatores morfológicos (área foliar, proporção de raiz), fisiológicos (assimilação líquida, fotossíntese, respiração, composição química) e ambientais (luz, nutriente, água) (Pinzón-Torres, & Schiavinato, 2008; Villar et al., 2008).

2.4. As Soluções de base Natural (SbN)

Para alcançar os ODS, em março 2022, a V Assembleia da Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente (ONU) adotou 14 resoluções para reforçar as ações pela conservação e proteção da natureza. E nessa resolução definiram as SbN como ações para proteger, conservar, restaurar, utilizar e gerir os ecossistemas de forma sustentável de modo que respondam aos desafios sociais, económicos e ambientais e ao mesmo tempo promovendo bem-estar humano e benefícios para a biodiversidade (UNEP, 2022).

A Comissão Europeia (EC, 2015), também define as SbN como sendo soluções inspiradas e apoiadas pela natureza que fornecem benefícios ambientais e não só, e que essas mesmas soluções tragam mais diversidade para a natureza por meio das intervenções das SbN.

As intervenções das SbN incluem conservação das florestas para apoiar a segurança alimentar e energética, os rendimentos locais, a adaptação e mitigação das alterações climáticas e a biodiversidade. Dessas intervenções as SbN são agrupadas em três categorias: (1) otimizar a utilização de ecossistemas naturais ou áreas protegidas; (2) implementar práticas sustentáveis nos ecossistemas; (3) incentivar a criação de novos ecossistemas de modo a minimizar os impactos das alterações climáticas (Cohen-Shacham et al., 2016).

Para uma compreensão abrangente de definição das SbN é importante considerar os oito princípios propostos pela UICN: (1) As SbN são adotadas para ajudar na conservação da

natureza e que nem toda a prática de conservação da natureza são consideradas com SbN; (2) podem ser implementadas misturadas com outras soluções ou não para enfrentar os desafios sociais; (3) são determinados por contextos naturais e culturais de cada local; (4) que os benefícios sociais produzidos sejam distribuídos de forma justa e equitativa, promovendo sempre a transparência e a ampla participação; (5) objetivam manter a diversidade biológica e cultural e a capacidade dos ecossistemas de se evoluir ao longo do tempo; (6) são aplicados em função de uma escala da paisagem; (7) precisam reconhecer e abordar os objetivos consoantes a produção de benefícios económicos imediatos para o desenvolvimento e as ações futuras para a produção de serviços ecossistémicos; e (8) são parte integrante da conceção global de políticas, medidas ou ações para responder a um desafio específico (UICN, 2016).

A Comissão Europeia, ao promover a aplicação de políticas baseadas em SBN, identificou quatro grandes objetivos associados com a inovação responsável para enfrentar desafios sociais: i) contribuir para uma urbanização mais sustentável, ii) a restauração de ecossistemas degradados, iii) a adaptação e mitigação das mudanças climáticas e iv) o fortalecimento da gestão de riscos e da resiliência. Além disso, essas abordagens podem ser implementadas tanto em contextos urbanos quanto rurais (EC, 2015).

No contexto do segundo (ii) objetivo identificado, restauração de ecossistemas degradados, entre as várias SbN que podem ser aplicadas para restaurar e reduzir as perdas do solo por erosão hídrica, bem como em aumentar a fixação de C, incluem-se os corretivos orgânicos, tipo composto (Figueiredo et al., 2023). De acordo com Oliveira et al. (2024), a compostagem e o composto que dela se deriva podem ser enquadrados como SbN, uma vez que se baseiam em processos naturais de decomposição para reciclar matéria orgânica, favorecer a regeneração de solos degradados, aumentar o teor de C e a matéria orgânica, além de reduzir os impactos ambientais associados à deposição de resíduos.

2.5. Tipo de SbN: Corretivos orgânicos

2.5.1. Corretivos orgânicos do solo (tipo composto)

Os corretivos orgânicos são definidos na Portaria nº 185/2022 de 21 de julho como o corretivo agrícola de origem vegetal, ou de origem vegetal e animal, utilizado principalmente com o objetivo de aumentar o nível de matéria orgânica do solo. Entre os

principais tipos de corretivos orgânicos destacam-se: o corretivo composto, o corretivo resultante do substrato utilizado na produção de cogumelos e o vermicomposto.

Conforme a Portaria nº 185/2022 no anexo I grupo 5, a maioria são produtos obtido mediante processo controlado de transformação e estabilização de resíduos orgânicos que constam no Anexo IV. Dito Anexo lista uma série de resíduos agroindustriais e silvícolas; entre eles o bagaço de azeitona (BA) que é um dos principais resíduos agroindustriais da região Nordeste de Portugal, com uma produção anual de azeitona de 1 176 087 ton/ano (INE, 2024).

O bagaço de azeitona (BA) é um tipo de resíduo agroindustrial, resultante da produção de azeite (por cada litro de azeite se produzem 4,5 litros de BA), que está excluído do novo Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR) sempre que seu destino final seja a valorização orgânica indireta (ex: compostagem) (APA, 2023). Trata-se dum subproduto semi-sólido, pastoso, húmido (55-65%), com características moderadamente ácidas (pH 5,3-5,4) e fitotóxicas, devido aos seus constituintes fenólicos e lipídicos (Albuquerque et al., 2006). É composto por fragmentos de caroço, polpa da azeitona, água de vegetação, componentes orgânicos, tais como lignina, celulose e hemicelulose e sólidos minerais (Rincón et al., 2013; Niaounakis & Halvadakis, 2006).

O BA não pode ser aplicado diretamente ao solo devido a sua alta fitotoxicidade, sendo necessário seu tratamento prévio através de processos de compostagem (Hernández et al., 2022). Esse processo transforma por ação dos microrganismos os resíduos orgânicos fitotóxicos em fertilizantes úteis e valiosos para a agricultura. Esses resíduos são valorizados e utilizados de maneira eficiente e sustentável para melhorar o solo e o crescimento de plantas (Coelho et al., 2009). O processo de compostagem do BA pode ser feito com técnicas de ar-passivo, onde o BA é misturado com outros resíduos vegetais que atuam como agentes estruturantes (como a casca de frutos secos ou restos florestais), e o composto final pode ser aplicado como fertilizante para o solo ou como substrato para plantas (Segatelli et al., 2023).

O composto de BA caracteriza-se por ser um adubo orgânico classe A, com alto teor de C orgânico e sais minerais, e com baixo teor em metais pesados (Tabela 1 em anexo 3) (Hernández et al., 2024). Recentes trabalhos mostram como a aplicação de composto de BA aumenta o C do solo em 1-2% (Toloto et al., 2024), e melhora as propriedades físicas de agregação que melhoram a retenção de água no solo (Royer et al., 2024).

Conforme apresentado por Figueiredo et al. (2023), descrevem a utilização de composto e biochar produzidos à base de BA como SbN aplicadas em contextos de reflorestação. Assim, o composto de BA pode ser enquadrado como uma SbN, uma vez que a sua valorização através da compostagem transforma um resíduo agroindustrial num recurso útil, contribuindo para a economia circular e mitigando os impactos ambientais associados ao seu descarte, melhora a qualidade e a biodiversidade do solo, reduz a dependência de fertilizantes químicos e promove práticas agrícolas sustentáveis (Alharbi & Ghonimy, 2025; García-Rández et al., 2025; Sosa et al., 2023), alinhando-se, portanto com os objetivos das SbN.

2.6. Problemas de degradação do solo – Impacto do incêndio de Picões

A degradação do solo ocorre quando há mudanças nos seus constituintes, propriedades ou funcionamento que resulta na perda da sua capacidade em desempenhar funções essenciais nos ecossistemas, como a retenção de água, o fornecimento de nutrientes e a estabilidade estrutural (Bompastor, 2009).

Segundo Figueiredo et al. (2015), os solos mais degradados do Nordeste de Portugal são aqueles que apresentam uma espessura inferior a 30 cm; elevado risco de erosão e pedregosidade superior a 30%. Esses solos são predominantemente Leptosolos, derivados de xisto e granito, e são abundantes em Trás-os-Montes (Figueiredo, 2012).

Os incêndios podem alterar a composição do solo, e a sua recuperação e da vegetação após incêndios é muito lenta. Nas zonas de montanha torna-as mais suscetíveis a impactos ambientais. No Parque Natural de Montesinhos, por exemplo, a vegetação foi reduzida drasticamente e conseqüentemente, levou-se a degradação do solo (Figueiredo et al., 2023).

Um outro exemplo foi o grande incêndio de Picões, que aconteceu no ano de 2013, devastando cerca de 14.912 hectares nos concelhos de Alfândega da Fé, Mogadouro, Torre de Moncorvo e Freixo de Espada-à-Cinta. Teve um impacto significativo na biodiversidade local, com áreas devastadas, perda de cobertura vegetal e do solo; dada a alta degradação dos solos, o restauro natural da floresta nativa não aconteceu (Figueiredo et al., 2023).

Neste sentido, surge a necessidade de soluções sustentáveis para restaurar solos pós-incêndio, onde o uso por exemplo de compostos orgânicos, como o bagaço de azeitona,

tem sido amplamente estudado como promotor para aumento de matéria orgânica e fertilidade do solo, bem como na recuperação de solos degradados (Figueiredo et al., 2023; Oliveira et al., 2024).

3. Metodologia

A metodologia divide-se em 2 seções:

Seção 1: Monitorização da taxa de germinação e crescimento em plantas jovens de Medronheiro (em condições controladas): Em primeiro lugar, foi desenvolvido um ensaio, em condições controladas (estufas de IPB), para avaliar a taxa de germinação e sobrevivência da espécie em SbN. A seguir, foram monitorizadas as taxas de crescimento das plantas (altura e número de folhas) durante um ano de estudo, de forma também a obter os dados suficientes para a elaboração de um modelo de crescimento.

Seção 2: Monitorização de nível de vitalidade em campo de plantas jovens de Medronheiro: De forma paralela, foram desenvolvidos ensaios em campo para avaliar o nível de vitalidade de plantas jovens de Medronheiro no primeiro ano após a sua replantação na área de estudo.

3.1. Área de estudo

A Área de estudo localiza-se nos Lagos do Sabor, Mogadouro, Bragança (Figura 1 em anexo 1), que corresponde com uma zona com problemas de degradação de solos, devido ao incêndio de Picões ocorrido no ano de 2013, onde a reflorestação e a aplicação de condicionadores de solo surge como uma solução para acelerar a recuperação do ecossistema (Figueiredo et al., 2023).

A região dos Lagos do Sabor está sendo restaurada, com a participação em dois projetos financiados pela EU, que estão a ser desenvolvidos na mesma área. Entre eles, o projeto Compete ForestWaterUp visou a rearborização com plantas mediterrânicas de 32 hectares nos Lagos do Sabor, promovendo o restauro dos serviços dos ecossistemas. A rearborização foi reforçada pela aplicação de composto orgânico como SbN.

No outono de 2023 foi desenvolvida uma reflorestação em 22 parcelas, com aproximadamente 20.000 plantas de seis espécies mediterrânicas, das quais 6.000 plantas de Medronheiro, com uma densidade de 550 plantas/ha e um compasso de 6x3m. Para cada parcela foram distribuídas as seis espécies mediterrânicas, entre as quais o Sobreiro,

a Azinheira e o Medronheiro. Estando prevista a monitorização de todas as parcelas durante 2 anos (2024 e 2025), com o objetivo de avaliar o nível de vitalidade das plantas. No presente estudo, apenas o Medronheiro foi alvo de monitorização detalhada. Assim, neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos em 5 parcelas (2, 3, 4, 5 e 6) referentes a monitorização do primeiro ano (primavera e outono de 2024).

Seção 1: Monitorização da taxa de germinação e crescimento em plantas jovens de Medronheiro

3.2. Taxa de germinação do Medronheiro

De modo a avaliar a taxa de germinação de Medronheiro em condições controladas, foi desenvolvido um ensaio na estufa do IPB.

Primeiramente, os frutos foram colhidos na floresta nativa de Santo André (Mogadouro) não afetada pelo grande incêndio de Picões, ao abrigo do curso de formação Ecology Day (2023). Após a colheita, os frutos foram submetidos a um processo de limpeza destinado à extração das sementes. Para tal, os frutos foram lavados em água corrente e manualmente até à completa separação da polpa. A remoção do material aderente (polpa) foi facilitada com o auxílio de uma peneira fina, onde as sementes foram cuidadosamente friccionadas para eliminar os resíduos da polpa, obtendo-se assim sementes limpas e adequadas para a observação. Posteriormente, selecionou-se as sementes que apresentavam uma estrutura íntegra, sem sinais de danos ou deformações, com base a observação direta no binocular.

As condições da estufa foram mantidas com temperaturas positivas, variando de 12°C (mês mais frio) a 29°C (mês mais quente), com exposição à luz natural e irrigação diária de 1 mm/diário por meio de um sistema de rega em aspersão.

O ensaio iniciou-se com a sementeira de 1620 sementes de Medronheiro em janeiro de 2024. Sendo as sementes distribuídas em três tratamentos: i) um composto orgânico a base de BA como SbN (MC), ii) um substrato comercial (previamente aquecido e com uma solução nutritiva de base, em modo ecológico) (MS) iii) e um tratamento de areia (MT), sem solução nutritiva, como testemunha (Figura 1). Anexo 3 – Tabela 1, podem ser observadas as principais características físicas e químicas dos três tratamentos do delineamento experimental, destacando o alto teor de nutrientes no SC e baixo na areia, assim como as melhores propriedades físicas do SS.

Para o ensaio foram preparados quinze tabuleiros com os três tipos de tratamentos (cinco tabuleiros para cada tipo de tratamento). Cada tabuleiro contém 54 cavidades e foram semeadas duas sementes em cada cavidade, sendo 108 sementes por tabuleiro.

A germinação das sementes foi monitorizada semanalmente nos dias 20, 28, 40 e 48 após a semeadura, correspondendo as datas 8, 15, 28 de fevereiro e 7 de março respectivamente.

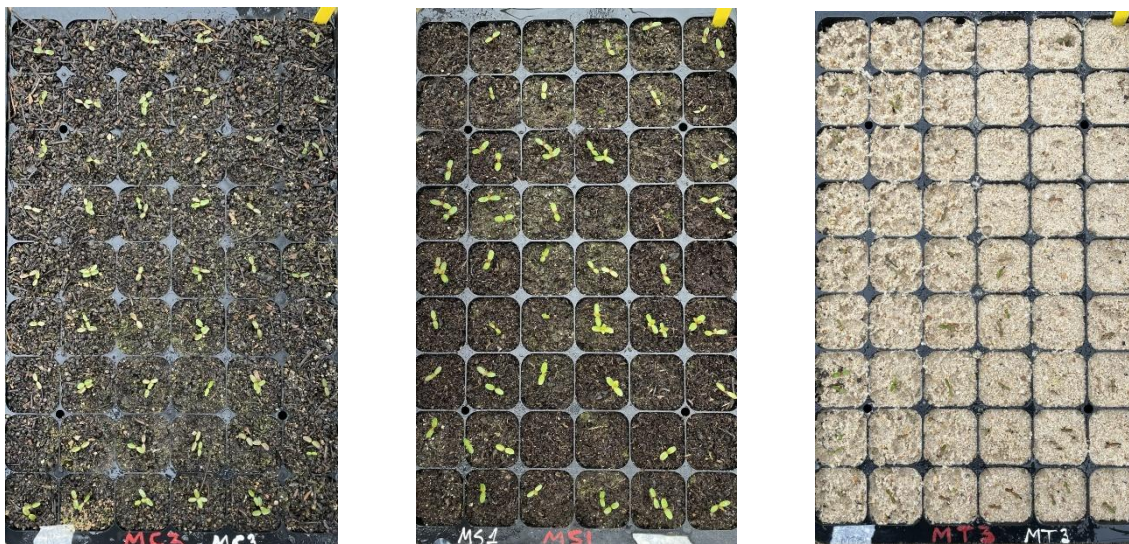


Figura 1: Germinação das sementes de Medronheiro em 3 tratamentos: a) SbN-composto (MC) b) Substrato comercial (MS) c) Testemunha (MT).

A Taxa de germinação foi calculada utilizando a seguinte fórmula (*fórmula 1*), proposta por Labouriau & Valadares, 1976, como citado por Silva et al., 2012:

Fórmula 1: Taxa de germinação

$$TG (\%) = \text{número de sementes germinadas} / \text{número de sementes semeadas} \times 100$$

3.3. Taxa de crescimento de plântulas de Medronheiro

Após a germinação das sementes no mês de fevereiro de 2024, iniciou-se o acompanhamento do crescimento das plântulas, mediante as medições semanais e/ou quinzenais das variáveis biométricas: altura da planta e o número de folhas, sendo monitorizados um total de 525 plantas distribuídas em três tratamentos (correspondendo a 146 para o MT, 209 para MC e 170 para MS). As medições foram realizadas utilizando uma régua, registrando-se a altura desde a superfície do substrato até ao ápice da plântula, enquanto o número de folhas correspondeu ao total de folhas visíveis. Inicialmente foi feita a contagem apenas de número de folhas da plântula e posteriormente, a altura e o número de folhas. As plantas permaneceram nos mesmos tabuleiros ao longo de todo o

período experimental, mantendo-se as condições ambientais da estufa semelhantes às descritas para o ensaio de germinação. Esse acompanhamento teve a duração de um ano, desde a germinação em 2024 até janeiro de 2025 (Figura 2).



Figura 2: Plântulas de Medronheiro após seis meses (a), e plantas depois dum ano na estufa (b).

E depois calculou-se a Taxa de crescimento absoluto (TCA) que é a variação ou o incremento do crescimento entre duas amostragens ao longo do ciclo (Oliveira, 2016). Essa taxa foi calculada para os dados de crescimento em altura e em número de folhas, aplicando-se a fórmula a seguir (*fórmula 2*):

Fórmula 2: Taxa de crescimento absoluto (TCA)

$$TCA = (AP2 - AP1) / (T2 - T1)$$

Onde: TCA - Taxa de crescimento absoluto com relação à altura e número de folhas; AP2 e AP1 - Variação de crescimento da planta em altura e em número de folhas entre duas amostragens tomadas nos tempos T1 e T2; T2 e T1 - Intervalo de tempo entre as avaliações (final e inicial), em dias.

No final do processo de medição biométrica, procedeu-se à determinação da biomassa das plântulas por meio de método destrutivo, aplicado a 50 plantas de Medronheiro, sendo 25 pertencentes ao tratamento MC e 25 ao tratamento MS. As plântulas de MT não desenvolveram na areia pelo que não foi possível fazer esta medição de biomassa. A colheita das plântulas foi realizada manualmente e de forma cuidadosa, preservando a integridade das estruturas aéreas e radiculares. As plântulas foram então lavadas em água para remoção de partículas de solo aderidas às raízes, garantindo uma limpeza adequada sem danificar as plântulas (Figura 3).



Figura 3: Colheita integral das plantas de Medronheiro, incluindo o sistema radicular, (a) e planta limpa para posterior análise de biomassa (b).

A seguir, cada plântula foi separada manualmente em duas frações: parte aérea (folhas e talos á altura de desenvolvimento de cotilédones) e parte subterrânea (raízes e lignotuber) e foi devidamente identificada (Figura 4). De seguida, foi realizada a pesagem das amostras frescas (biomassa fresca), permitindo o registo da massa fresca de cada fração da planta (Figura 5 a).



Figura 4: Planta de Medronheiro separada em fração aérea (talo e folhas) e subterrânea (lignotuber e raízes) (a) e devidamente identificada (b).

Posteriormente, as amostras foram levadas à estufa com temperatura controlada a 65 °C permanecendo na estufa durante 48 horas. Após esse período, as amostras foram retiradas da estufa e fez-se a pesagem da massa seca (biomassa seca) (Figura 5 b).



Figura 5: Biomassa fresca – parte aérea (a) e biomassa seca - folhas (b) duma planta de Medronheiro; dados obtidos em balança de precisão.

Com os valores obtidos, procedeu-se ao cálculo da biomassa (em massa seca). A biomassa aérea e a biomassa subterrânea foram somadas para determinar a biomassa total de cada planta. Além disso, foram realizados cálculos para avaliar o conteúdo e a eficiência no uso da água, permitindo uma compreensão mais detalhada do desempenho das plantas em relação à sua capacidade de absorção e aproveitamento hídrico. A partir dos dados de biomassa (em massa seca) calculou-se a fixação de CO₂ por planta (*fórmula 3*), considerando que 50% da biomassa das plantas é carbono, assim como sua correspondência de C-CO₂ (Arevalo et al., 2002):

Fórmula 3: Fixação do C na biomassa vegetal total (t/ha)

$$CBV \text{ (t/ha)} = BVT * 0,5 * FC$$

Onde: CBV (t/ha) = C na biomassa vegetal, BVT = biomassa vegetal total (massa seca), 0,5 = fator de conversão de biomassa a C; FC = fator de conversão de C a CO₂ eq.=3,67

Por outro lado, serão avaliados os efeitos da SbN (composto de bagaço de azeitona) no crescimento e desenvolvimento das plântulas de Medronheiro, em comparação com SS e usando areia como testemunha (ST).

3.4. Preparação das amostras de folhas do Medronheiro para análise de nutrientes

Após a determinação da biomassa, as folhas secas foram trituradas da forma a seguir. Primeiramente, foram submetidas a um processo de trituração num triturador mecânico IKA-WERK; depois, o material triturado foi transferido para um almofariz com pistilo,

onde se realizou uma moagem manual complementar, obtendo-se uma textura mais fina. De seguida, o material moído foi crivado, utilizando crivo de 106 μm . Esta etapa permitiu a separação entre a fração grosseira (partículas $> 106 \mu\text{m}$) e a fração fina ($< 106 \mu\text{m}$) (Figura 6).



Figura 6: Procedimento de preparação de amostras: Folhas no triturador mecânico (a), folhas moídas no almofariz (b) e separação final com crivo de 106 μm (c).

A fração fina resultante foi devidamente etiquetada e enviada para laboratório especializado, onde foram realizados os ensaios químicos para determinação da composição nutricional das folhas, incluindo macronutrientes: Azoto (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) e micronutrientes: Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Cobre (Cu). A metodologia usada foi oxidação da amostra em meio ácido e posterior determinação analítica por ICP-massas.

3.5. Modelação do crescimento de Medronheiro

Para modelar o crescimento de Medronheiro no primeiro estágio de crescimento (plântulas-plantas), e descrever a eficácia da SbN-composto proposto, em comparação com o substrato comercial SS, foi utilizado o software Stella para modelar o crescimento das plantas de Medronheiro ao longo do tempo. Não foi possível incluir o tratamento MT pois as plântulas germinadas não desenvolveram a estágio de plantas.

O Stella é um software amplamente utilizado em áreas como ciências ambientais para modelação de sistemas dinâmicos, permitindo criar diagramas pictóricos e atribuir valores e funções aos elementos do sistema. Possui quatro principais componentes: Stocks (acumulam entradas e saídas), Fluxos (controlam trocas entre variáveis),

Conversores (valores auxiliares, constantes ou dependentes) e conectores (ligam elementos do modelo) (Ouyang et al., 2016).

Para o desenvolvimento deste modelo, baseou-se nos dados do crescimento das plantas de Medronheiro obtidos durante o ensaio de monitoramento dum ano (em condições controladas), explicado previamente, considerando como variáveis biométricas: altura, número de folhas, biomassa e fixação de CO₂. Além disso, foram incorporados fatores ambientais que influenciam o crescimento, incluindo água e temperatura. A partir dos dados da variável biométrica, calculou-se as taxas de crescimento referentes ao número de folhas e das alturas. Importa salientar que as taxas de crescimento calculadas para este modelo foram variadas. Tendo em conta que o ensaio foi desenvolvido em condições controladas, a diferença na Taxa de crescimento absoluto (TCA) dos diferentes tratamentos (MC e MS), encontra-se no teor de nutrientes e propriedades físicas do meio onde elas desenvolvem.

Seção 2: *Monitorização de nível de vitalidade em plantas jovens de Medronheiro (em campo)*

3.6. Monitorização de nível de vitalidade em campo de plantas de Medronheiro

A efeito deste trabalho, foram realizadas duas monitorizações de plantas arbóreas na área de reflorestação, isto é, nos meses de junho e setembro de 2024, de modo a calcular o nível de vitalidade do Medronheiro após ações de reflorestação. Os dados recolhidos em campo foram registados numa Ficha de campo para padronizar a recolha de dados e garantir que a informação seja registada de forma organizada (Anexo 2 - Figura 2). Foram tomados os dados da localização espacial (georreferenciação da parcela), SbN utilizada, espécie florestal, nível de vitalidade, altura e número de folhas. Os dados recolhidos permitiram calcular o nível de vitalidade do Medronheiro antes e depois do período estival.

A análise e o tratamento dos dados foram realizados com recurso a três ferramentas principais: Microsoft Excel para organização dos dados e estatística descritiva; Stella para a modelação do crescimento do Medronheiro; e Box-and-Whisker Plot para análises estatísticas avançadas, incluindo ANOVA e testes de comparações.

4. Resultados e discussão

Os resultados obtidos durante as atividades práticas (de campo, e laboratório) foram organizados em 2 secções, de modo a dar respostas aos objetivos definidos.

Seção 1: Monitorização da taxa de germinação e crescimento em plantas jovens de Medronheiro

4.1. Taxa de germinação do Medronheiro

Na avaliação da taxa de germinação de sementes de Medronheiro, observou-se um aumento progressivo da germinação no primeiro mês depois da sementeira (Figura 7). O período de germinação total demorou 48 dias. Iniciou-se no dia 19/01/24 com 108 sementes semeadas por tabuleiro dos três tratamentos (MC, MS e MT), com 4 períodos de monitorização: aos 20, 28, 40 e 48 dias depois da sementeira.

Os dados médios, acompanhados de análise estatística por ANOVA de fator único (Anexo 5 - Figuras 4 a 11), permitiram identificar diferenças significativas entre os tratamentos em todas as datas (p-valor <0,05), conforme se explica a seguir (Figura 7):

- Dia 20 depois da sementeira (dds) (08 de fevereiro): A média da taxa de germinação foi mais elevada em MS (32%), seguido de MC (19%) e MT (12%). A análise de variância indicou diferenças significativas entre os grupos (p-valor = 0,015), com destaque para o MS.
- Dia 28 dds (15 de fevereiro): Observou-se um aumento geral na média da taxa de germinação. O substrato MC passou a apresentar a maior média (40%), seguido de MS (37%) e MT (27%). A diferença entre os grupos manteve-se estatisticamente significativa (p-valor = 0,033).
- Dia 40 dds (28 de fevereiro): MC continuou com a maior média (43%), seguido de MS (37%) e MT (33%). A ANOVA confirmou novamente diferença significativa entre os tratamentos (p-valor = 0,019).
- Dia 48 dds (7 de março): MC consolidou-se como o tratamento com melhor desempenho (44%) superando MS (37%) e MT (32%). E a diferença manteve-se estatisticamente significativa (p-valor = 0,012).

Alem disso, o teste Mínima diferença significativa (MDS) confirmou que o tratamento MC apresentou diferenças significativas em relação ao tratamento MT, principalmente nas últimas datas (40 e 48 dds). Os resultados indicam que o tratamento MC é o mais

eficaz para promover a germinação das sementes, com uma taxa de germinação superior. O tratamento MS, apesar do bom arranque inicial, não apresentou melhorias após a segunda medição. Já o tratamento MT revelou-se o menos eficiente em todos os momentos.

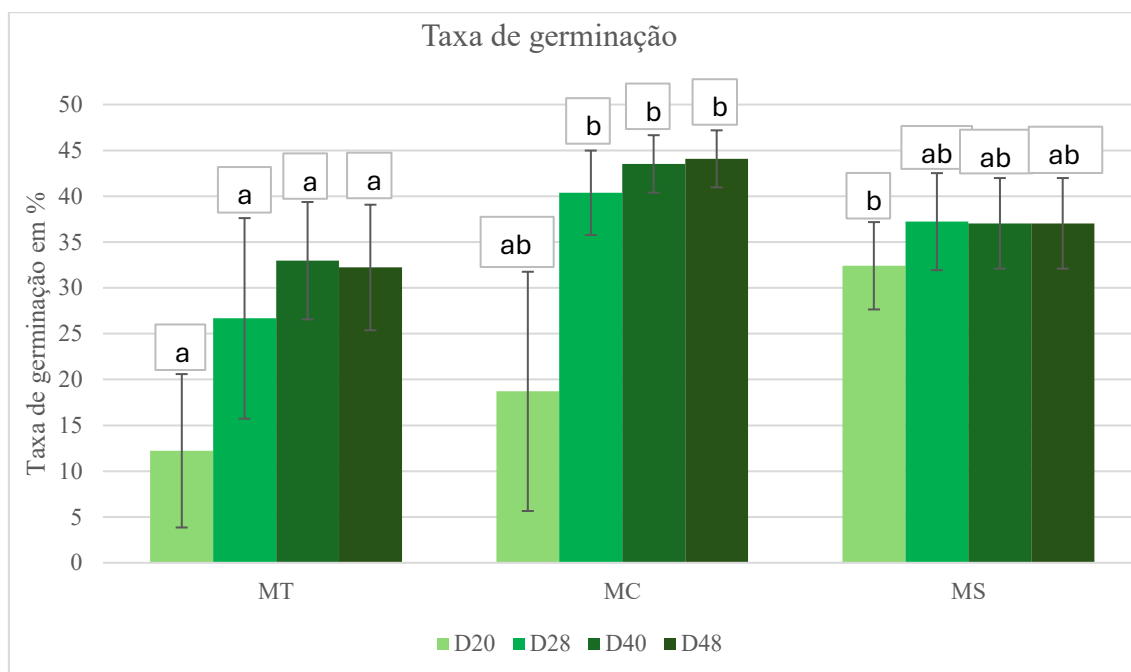


Figura 7: Taxa de germinação (%) das sementes de Medronheiro por tratamento: MT - testemunha, MC - composto BA e MS - substrato comercial (teste ANOVA, p-valor <0,05, onde as letras minúsculas indicam quais grupos têm médias significativamente diferentes entre si, a um nível de confiança de 95%).

De forma geral, o tratamento MC apresentou a maior taxa de germinação no final do período de germinação, aos 48 dias (44%), seguido de MS (37%) e MT (32%). Destaca-se que o tratamento MS apresentou uma germinação inicial mais rápida, aos 20 dias (32%), embora tenha sido posteriormente ultrapassado por MC. Vasques et al., (2013), em testes em incubadora com um fotoperíodo de 12:12h, observaram uma taxa da germinação ao fim de 21 dias, quando atingiu uma média de 70-90%. O anterior indica que as condições de germinação de nosso ensaio foram menos favoráveis.

A figura 8 mostra a evolução temporal da germinação de sementes submetidas nos três tratamentos. O tratamento MT iniciou com a menor germinação e demonstrou um aumento gradual ao longo do tempo, atingindo 36 sementes germinadas até ao D40, mantendo-se estável até o final do período observado. Por outro lado, o tratamento MC revelou um desempenho superior desde o início em comparação com MT, destacando-se especialmente entre D20 e D28, quando ocorreu um crescimento acentuado na taxa de germinação, passando de cerca de 20 para 44 sementes germinadas. Este valor manteve-

se elevado até D48 com 48 sementes germinadas, demonstrando a eficácia do tratamento. Já o tratamento MS apresentou a maior taxa de germinação logo no início, com 35 sementes germinadas. No entanto, ao contrário dos demais, não mostrou variações significativas ao longo do tempo, mantendo-se praticamente constante durante todo o período avaliado. No final do período foram germinadas no total 124 sementes (sendo 48 para MC, 40 para MS e 36 para MT).

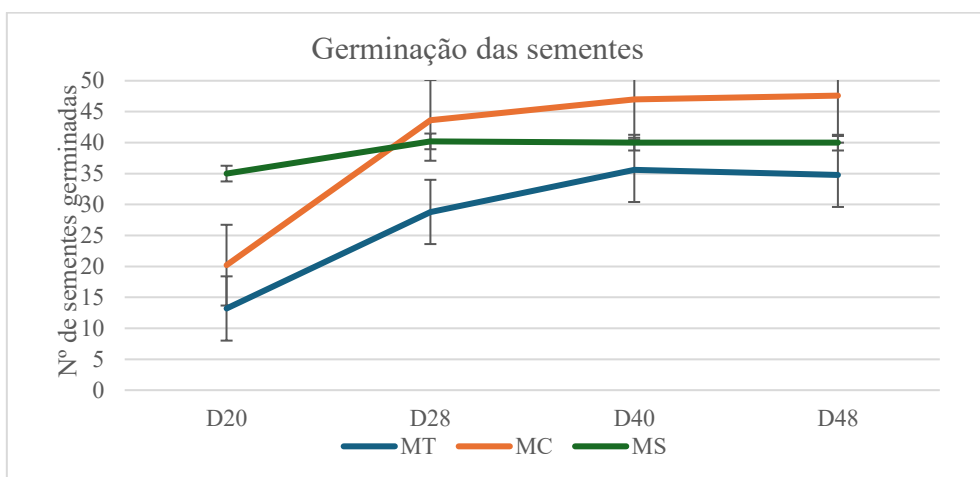


Figura 8: Número de sementes germinadas por tratamento (MT, MC e MS) ao longo do tempo (20, 28, 44 e 48 dds).

Os dados indicam que o tratamento MC foi o mais eficaz no estímulo à germinação ao longo do tempo, enquanto o MS, embora tenha iniciado com bons resultados, a sua evolução não superou o MC. O MT apresentou crescimento progressivo, mas manteve-se como o tratamento menos eficaz.

Em anexo 3 na Tabela 1, podemos observar que o substrato comercial (SS) apresenta o maior teor de humidade (61,3%) e a maior porosidade (74,7%), seguido do composto (SC) (16,4% de humidade e 63,7% de porosidade) e da areia (ST) (10,6% de humidade e 57,9% de porosidade). Estudo desenvolvido por Vasques et al. (2013) e Vilhena (2019) demonstram que a disponibilidade hídrica é essencial para a germinação. Entretanto a elevada humidade inicial no SS pode explicar a rápida germinação nos primeiros 20 dias. Contudo, a retenção excessiva de água reduz a oxigenação das plantas, consequentemente as raízes, limitando o seu desenvolvimento ou tornando o crescimento mais lento (Tong et al., 2021; Van Nguyen et al., 2024). Já o SC manteve um equilíbrio favorável entre humidade e a porosidade, e maior quantidade de N e K, sustentando uma germinação mais estável ao longo do tempo. Por outro lado, ST apresentou valores muito inferiores

de nutrientes, demonstrando uma disponibilidade limitada de K, Ca e Mg, o que poderia explicar as taxas de germinação mais baixas.

4.2. Taxa de crescimento de plântulas de Medronheiro com SbN

A taxa de crescimento das plantas foi avaliada de forma a demonstrar o desempenho da SbN denominada como MC-composto de BA, em comparação com um substrato convencional (MS) e uma areia como testemunha (MT), em condições controladas de Temperatura (12-29°C) e água (1 mm/d). A variável biométrica: altura das plantas foi medida durante um período de 225 dds (de 140 a 365 dds) com um período de revisitação de 8 a 15 dias, num total de 17 medições de 100% de plantas, desde o estágio inicial de plântula até ao estado da planta jovem (1 ano).

Os resultados da variável altura das plantas demonstraram que os tratamentos MS e MC apresentaram as melhores taxas de crescimento, ambas com 0,6 mm/dia, enquanto o MT apresentou apenas 0,1 mm/dia. Vasques et al. (2013), observaram que plântulas de Medronheiro cresceram cerca de 0,5 mm/dia (em 1 mês); assim como uma taxa de crescimento de 0,01 para as plântulas de zonas mais húmidas (Gerês, Portugal); o que se assemelha aos resultados obtidos no nosso trabalho. Na figura 9, observar-se que as plantas de Medronheiro alcançaram uma altura média de 18 +/- 2,51 cm no tratamento MS, mostrando melhor desenvolvimento e uma função exponencial, com a equação $y = 5,0692e^{0,0833x}$ e um coeficiente de correlação $r^2 = 0,9472$. No tratamento MC, a altura média foi de 16 +/- 2,36 cm e uma função exponencial, com a equação $y = 2,1251e^{0,1274x}$ e com $r^2 = 0,9737$. No tratamento MT a altura média foi de 3 +/- 0,46 cm e uma função linear, com a equação $y = 0,1215x + 1,3213$ e um coeficiente de determinação $r^2 = 0,9803$, o que indica um bom ajuste aos dados.

Os resultados mostram que as plantas do tratamento MC tiveram um bom desempenho em termos de altura ao longo do tempo, apenas ultrapassado por o tratamento MS, enquanto o grupo MT teve o menor crescimento, evidenciando-se uma alta mortalidade ao fim 365 dias, possivelmente devido ao limitado desenvolvimento radicular no meio “areia grossa”. As análises das curvas de tendência e das taxas de crescimento indicam que os tratamentos aplicados aos grupos MC e MS foram mais eficazes para promover o desenvolvimento das plantas de Medronheiro em condições controladas.

Os dados evidenciam que substratos mais ricos em nutrientes, e com melhor retenção de água, como no caso de MC e MS (Anexo 3 - Tabela 1), favorecem o desenvolvimento

inicial da planta. Resultados semelhantes foram observados por Hammami et al. (2005), que verificaram maior germinação e crescimento de plântulas de Medronheiro em substratos contendo composto orgânico, em comparação com areia. Por outro lado, Castell & Terradas (1994), observaram que o aumento das taxas de crescimento em plantas adultas de Medronheiro, se deve à maior turgescência celular provocada pela melhoria do potencial hídrico foliar, e não a um aumento da fotossíntese; o que explicaria sua melhor resposta a condições de rega. No entanto, durante a seca estival, exibem um uso de água muito conservador e não aumentam a condutância foliar. O MT mostrou-se menos eficaz em retenção de humidade e conteúdo de nutrientes, resultando em um crescimento reduzido e alta mortalidade, comportamento coerente com o entendimento de que, embora o Medronheiro seja tolerante a condições áridas, ainda exige substrato adequado para estabelecimento inicial vigoroso, que forneça retenção de água, nutrientes e condições físicas favoráveis à enraizamento (Santiso & Retuerto, 2017; Vasques et al., 2013).

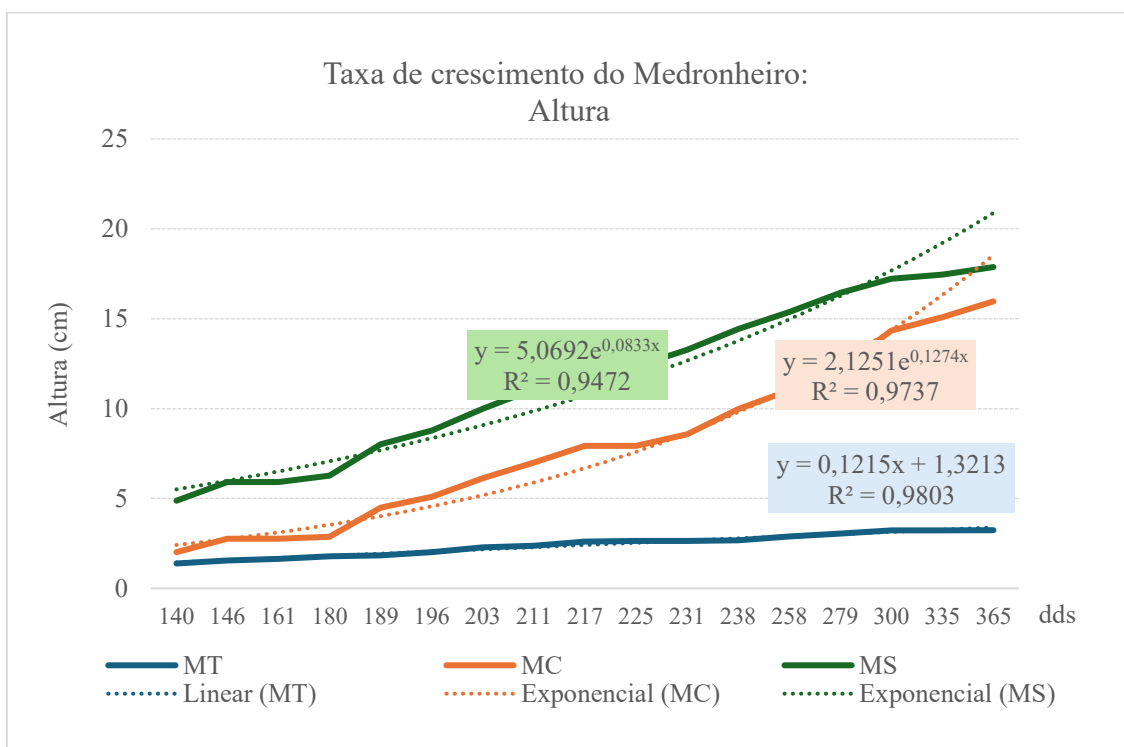


Figura 9: Taxa de crescimento em plantas de Medronheiro (estágio plântula a planta), sujeitas a 3 tratamentos (MT, MC e MS) em condições controladas (T^a , humidade); expressada em altura média das plantas durante 365 dias (Equações: funções exponenciais).

A variável biométrica: número de folhas das plantas foi medida durante um período de 329 dds (de 41 a 370 dds) com um período de revisitação de 8 a 15 dias, num total de 15 medições de 100% de plantas, desde o estágio inicial de plântula até ao estado da planta

jovem (1 ano). Quanto aos resultados de número de folhas das plantas, o tratamento MC obteve a melhor taxa de crescimento (0,08 folhas/dia), seguido do MS (0,06 folhas/dia) e enquanto o tratamento MT apresentou a menor taxa (0,03 folhas/dia). Na figura 10, os resultados demonstram que o tratamento MC apresentou um valor médio de 26 folhas por planta e um bom ajuste exponencial, com a equação $y = 0,9558e^{0,2085x}$ e $r^2 = 0,939$. Já o tratamento MS apresentou um valor médio de 22 folhas por planta, com a equação exponencial $y = 1,1649e^{0,207x}$ e um $r^2 = 0,9664$, indicando o melhor ajuste. No MT foi observada alta mortalidade ao final de 277 dds.

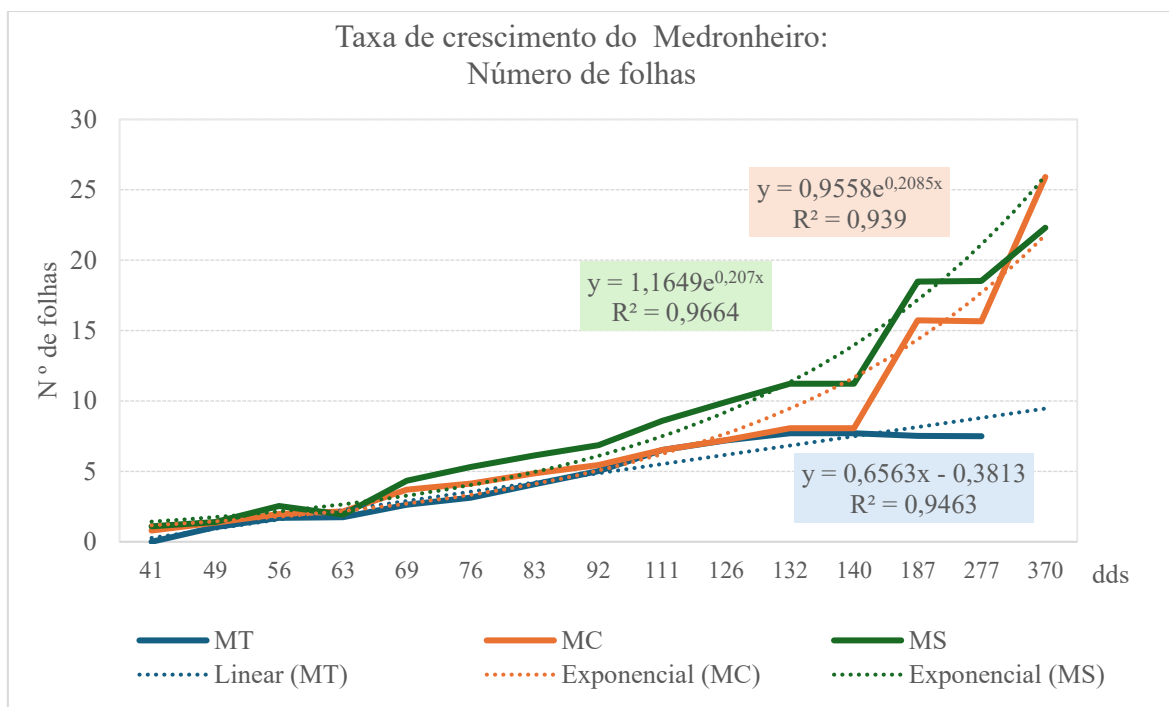


Figura 10: Taxa de crescimento em plantas de Medronheiro (estágio plântula a planta), sujeitas a 3 tratamentos (MT, MC e MS) em condições controladas (T^a, humidade); expressada na média de número de folhas das plantas durante 365 dias (Equações: funções exponenciais).

O grupo MC teve o melhor desempenho em termos de número de folhas, seguido de MS, ambos com crescimento exponencial ao longo do tempo, nomeadamente a partir dos 120 dds, enquanto o MT apresentou crescimento linear. Vasques et al (2013) observaram que as plântulas desenvolveram, em média, cinco novas folhas (em 1 mês), o que se ajusta a um crescimento linear nos primeiros 90 dias. Esse comportamento indica que o substrato MC-composto, pode ter exercido um efeito bioestimulante, promovendo maior diferenciação e crescimento foliar. Resultados semelhantes foram relatados por Maisto et al. (2025); Trejo-Téllez et al. (2022), que observaram maior desempenho fisiológico e fotossintético das plantas cultivadas em substratos com fertilizantes orgânicos. Além disso, Gugliuzza et al. (2012); Balzano et al. (2025) verificaram que a disponibilidade

hídrica afeta a eficiência fotossintética, contribuindo para o aumento de número de folhas por planta. Por outro lado, alguns estudos mostram pouco ou nenhum efeito da adição de nutrientes em aspectos da fisiologia e do crescimento das plantas (Castell & Terradas, 1994), o que sugere que o efeito bioestimulante do MC pode residir na sua maior capacidade de prover água às plantas.

Com o propósito de obter as equações alométricas entre variáveis biométricas altura e número de folhas, foram feitas 4 medições da altura e o número de folhas em todas as plantas. A figura 11 mostra a relação alométrica entre o número de folhas e a altura das plantas ao longo de quatro períodos de medição: 140, 187, 277 e 370 dds. Em cada uma dessas datas, foram ajustados modelos matemáticos para descrever a correlação alométrica entre altura e número de folhas. No primeiro período, 140 dds, a análise revelou uma forte correlação linear entre altura e número de folhas, expressa pela equação $y = 0,8433x - 4,8384$, com um coeficiente de determinação $r^2 = 0,9013$. No segundo período, 187 dds, ainda foi identificada uma relação linear, mas com um r^2 de 0,6331, o que aponta para uma redução na força da correlação em comparação com a data anterior. No terceiro período, 277 dds, ainda continuou sendo uma relação linear e a redução na força da correlação persistiu sendo a equação $y = 0,8039x - 0,6029$, com $r^2 = 0,6693$. No quarto período, 370 dds, não foi apresentada uma função de ajuste porque o valor de r^2 obtido foi muito baixo. Indicando que, a relação entre número de folhas e altura tornou-se extremamente fraca.

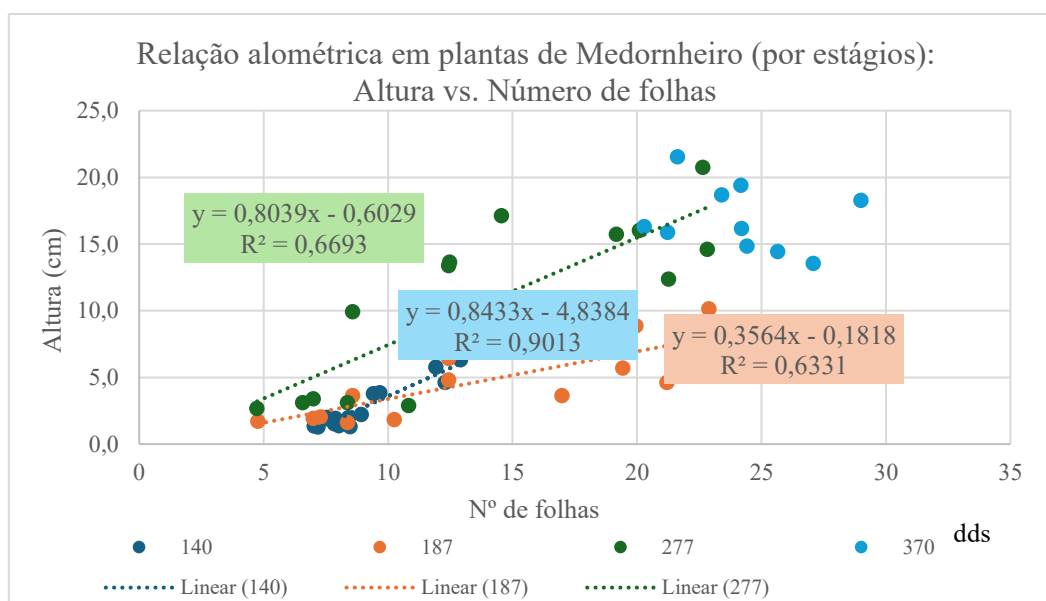


Figura 11: Relação alométrica entre as variáveis morfológicas altura e número de folhas em plantas de Medornheiro em diferentes períodos de crescimento (140, 187, 277, 370 dds), e em condições controladas. (Equações: funções lineares).

Na figura 12, que reúne todos os dados dos diferentes períodos de crescimento, foi ajustado um modelo linear, com a equação $y = 0,7448x - 2,699$ e $r^2 = 0,6823$. Embora ainda haja uma tendência positiva entre número de folhas e altura, o valor de r^2 indica que a correlação é menos consistente quando se considera todo o período de crescimento.

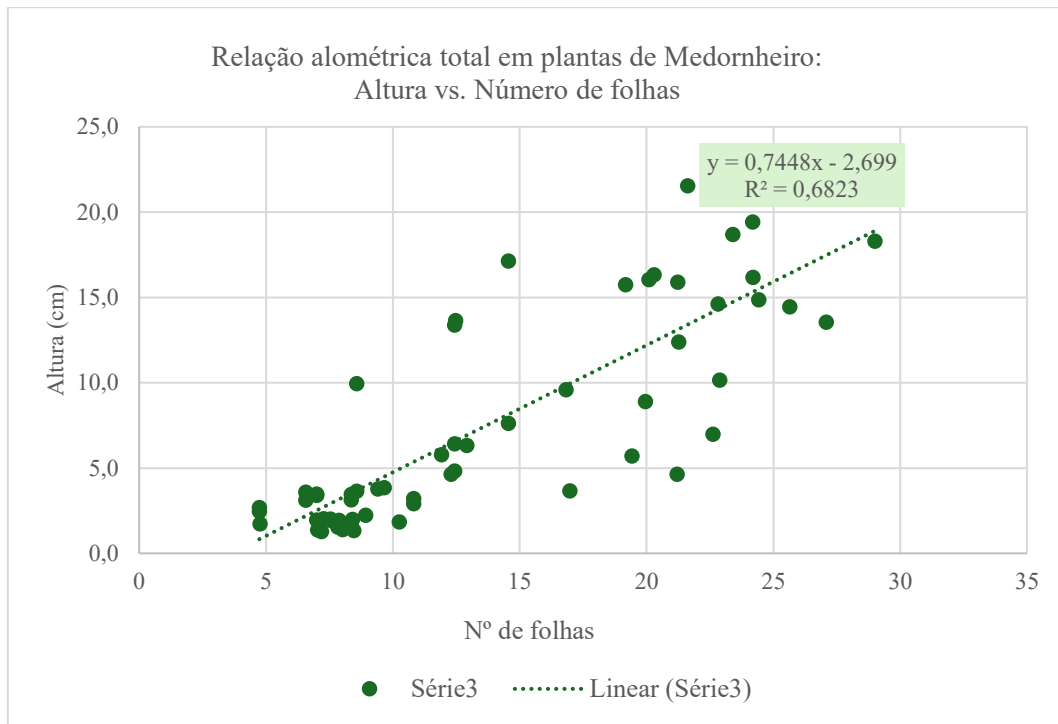


Figura 12: Relação alométrica média entre as variáveis morfológicas altura e número de folhas em plantas de Medornheiro em 365 dds e condições controladas de crescimento.

Os resultados das Figuras 11 e 12 evidenciam que, no início do desenvolvimento (estado plântulas), a altura das plantas está fortemente relacionada ao número de folhas. Contudo, com o passar do tempo, a relação torna-se mais fraca, sendo que a altura das plantas deixa de ser um indicador suficiente para prever ou estimar número de folhas em estágios mais avançados. Estudos desenvolvidos por Niklas & Enquist (2001); Shipley & Meziane (2002), mostram que as relações entre variáveis de crescimento (altura, folhas, biomassa) seguem padrões lineares em fase juvenil, mas perdem previsibilidade enquanto o desenvolvimento estrutural da planta for avançando. Isto pode explicar-se porque as plantas estavam em tabuleiros (de tamanho limitado), o qual pode ser um fator limitante para seu crescimento a partir dos 277 dds, indicando que é o momento de plantação em campo (Seção 2).

4.3. Análise dos dados da biomassa

A análise dos dados obtidos permitiu comparar os dois tratamentos MS e MC quanto à produção de biomassa, distribuição da biomassa em diferentes partes da planta (folhas, raízes e talo) e na proporção entre biomassa assimilatória e não assimilatória, considerando um número de amostras de 25 plantas por tratamento. O tratamento MT não foi considerado, porque as plantas não sobreviveram. Importa referir que os valores dos resultados que se encontram a seguir referentes a biomassa, conteúdo e eficiência no uso de água, correspondem a valores teóricos calculados para uma densidade de 600 plantas por hectare.

Os dados de produção de biomassa em peso seco (p.s.) por planta (Figura 13), demonstram valores de produção média superiores no tratamento MS (3,26 g/planta/ano) em relação ao tratamento MC (2,69 g/planta/ano), ainda que sem diferenças significativas. Segundo Romano (2001), o acúmulo de biomassa está diretamente relacionado à eficiência fotossintética e ao aproveitamento dos recursos edáficos. Resultados semelhantes foram observados por Röhl et al. (2021), que relataram incremento significativo de biomassa sob condições de maior disponibilidade hídrica, o que reforça que o tratamento MS promoveu condições mais favoráveis ao crescimento.

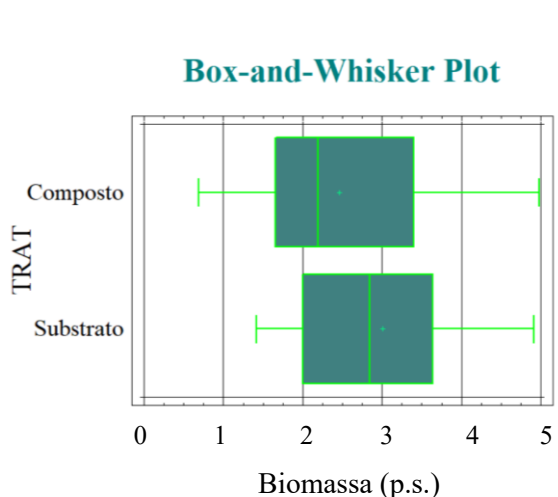


Figura 13: Gráficos Box-and-Whisker Plot da biomassa total (massa seca) das plantas de Medronheiro depois de 365 dias, sujeitos a dois tratamentos (MS-substrato e MC-composto), em condições controladas. (Teste ANOVA, p valor > 0,05).

Concernente aos resultados de conteúdo de água e eficiência no uso da água (Figura 14), indicam que, o tratamento MS apresentou diferenças significativas no conteúdo de água (65%) em relação ao MC (62%). Contudo, quando se analisa a eficiência no uso da água,

observou-se que o tratamento MC foi significativamente o mais eficiente (38%) do que o MS (35%) (Anexo 6 - Figura 12), isto é, a planta requer menos quantidade da água para produzir um grama de biomassa (p.s.). Embora o MS produza mais biomassa de acordo com resultado da figura 13, o MC consegue utilizar a água de maneira mais eficiente, o que representar uma vantagem importante em ambientes secos, já que a eficiência do uso da água é um dos principais indicadores de sustentabilidade em cultivos agroflorestais (Hatfield & Dold, 2019).

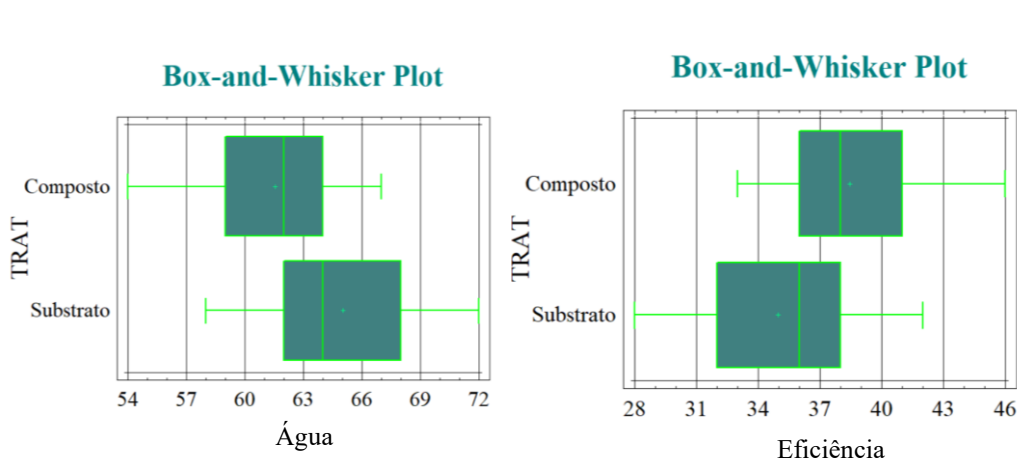


Figura 14: Gráficos Box-and-Whisker Plot das variáveis: a) conteúdo de água (esquerda) e b) eficiência do uso de água (direita) das plantas de Medronheiro depois de 365 dias, sujeitos a dois tratamentos (MS-substrato e MC-composto), em condições controladas. (Teste ANOVA, p valor < 0,05).

Em relação a distribuição da biomassa em folhas, raízes e talo (Figura 15), o tratamento MC concentrou maior proporção de biomassa na parte foliar (57%), do que o MS, que por sua vez apresentou 50%. O tratamento MS destacou-se com maior biomassa de talo (37%), comparativamente ao MC (29%). Na raiz, a proporção foi ligeiramente superior no MC (14 %) em relação ao MS (13%), ainda que sem diferenças significativas (Anexo 6 - Figura 13). Esses dados indicam que no tratamento MC-composto é favorecido a formação de estruturas aéreas fotossintéticas, enquanto o tratamento MS prioriza o desenvolvimento do talo. De um modo geral, as plantas que cresceram no tratamento MC-composto investiram mais em biomassa aérea (biomassa foliar, número de folhas), enquanto as plantas de MS desenvolveram relativamente mais biomassa não assimiladora (altura e peso do talo). De acordo com Poorter et al. (2012), a alocação de biomassa entre órgãos está intimamente relacionada à estratégia adaptativa da planta ao ambiente; neste estudo, apesar de que todas as plantas estavam sujeitas ao mesmo aporte de água (1mm/dia), as plantas de MS comportaram-se como se estivessem sob maior teor de água que MC.

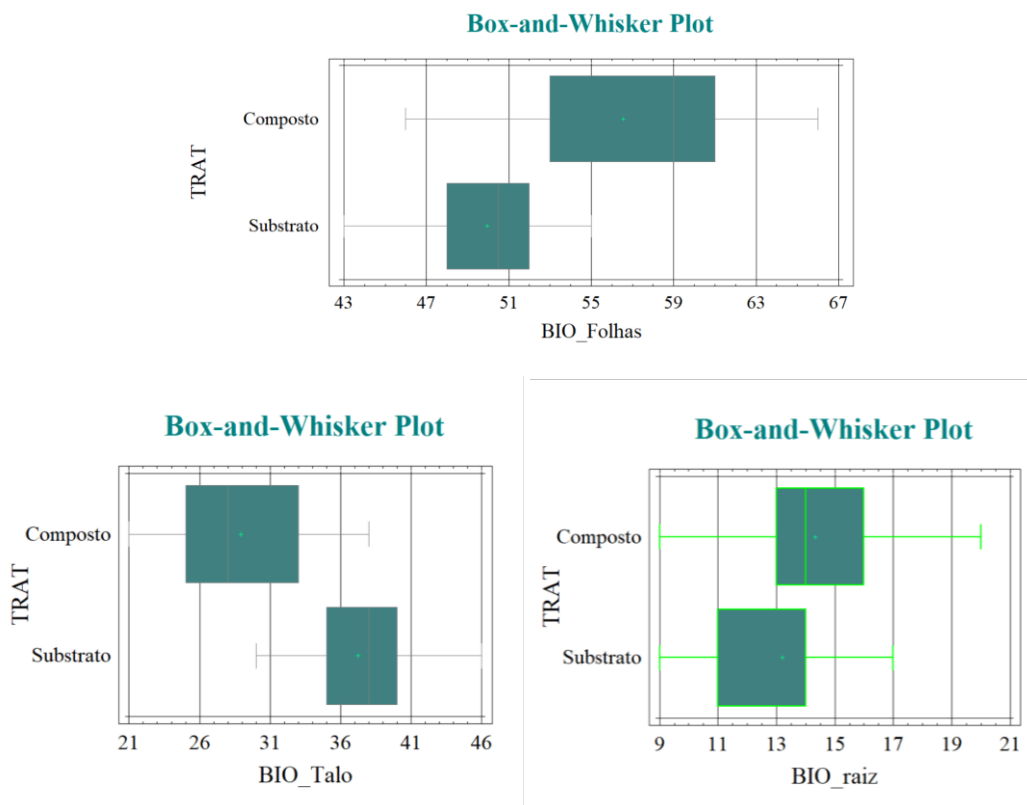


Figura 15: Gráficos Box-and-Whisker Plot das variáveis de biomassa: folhas, raízes e talo das plantas de Medronheiro depois de 365 dias, sujeitos a dois tratamentos (MS e MC), em condições controladas. (Teste ANOVA, p valor < 0,05).

Enquanto a biomassa assimilatória e não assimilatória (Figura 16), o tratamento MC apresentou maior proporção de biomassa assimilatória (57%), em relação ao MS (50%) relacionada às estruturas diretamente envolvidas na fotossíntese (folhas). Já o tratamento MS teve maior biomassa não assimilatória (50%) e MC (43%), ligada às estruturas de suporte (talo), apresentando diferenças significativas (Anexo 6 - Figura 14). Parece como se MC promovesse um crescimento mais orientado à captação de energia (fotossíntese), o que podia indicar um aumento da taxa fotossintética e da eficiência fotoquímica. Ajustes morfológicos semelhantes foram anteriormente reportados em *A. unedo* por Ogaya et al. (2003); Navarro-García et al. (2011); Vasques et al (2013). Enquanto o MS investe mais energia na estrutura de suporte da planta, de forma a manter os potenciais osmóticos positivos. O anterior confirma a hipótese proposta por Chaves et al. (2002) sobre que o aumento das taxas de crescimento em plantas mediterrânicas se deve à maior turgescência celular, provocada pela melhoria do potencial hídrico foliar, e não a um aumento da fotossíntese.

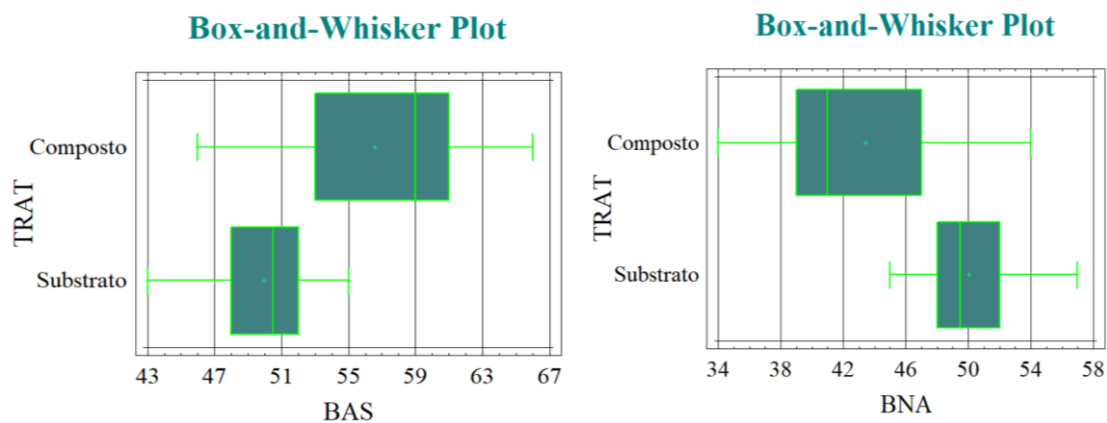


Figura 16: Gráficos Box-and-Whisker Plot das variáveis de biomassa assimilatória e não assimilatória das plantas de Medronheiro depois de 365 dias, sujeitos a dois tratamentos (MS e MC), em condições controladas. (Teste ANOVA, p valor < 0,05).

4.4. Taxa de fixação de CO₂

A tabela 1 apresenta os resultados de biomassa (p.s.) relativos à taxa de fixação de dióxido de carbono (CO₂), tanto por planta quanto por superfície (hectare), além da densidade de plantação e o número de amostras por tratamento. O número de amostras foi de 25 plantas para cada tratamento e ambos os tratamentos foram aplicados numa densidade de 600 plantas por hectare, o que garante comparabilidade direta dos resultados por superfície.

No que diz respeito a fixação de CO₂ por planta (g CO₂/planta/ano), o tratamento MS resultou numa taxa média de fixação de CO₂ de 5,98 +/- 2,10 g/planta/ano. O tratamento MC apresentou uma taxa inferior, de 4,93+/-2,35 g/planta/ano. Estes valores indicam que o tratamento MS promove maior capacidade de fixação de CO₂ por planta, o que está alinhado com os dados de biomassa total por planta. De acordo com Reich et al. (2014), o caule (talo) da planta tem uma taxa de renovação dos tecidos muito mais baixa do que raízes ou folhas e tendem a apresentar maior acúmulo de carbono nos tecidos lenhosos. Isto pode explicar o fato de que o tratamento MC, embora apresente um maior número e biomassa de folhas, não apresenta maior taxa média de fixação de CO₂.

E quanto a fixação de CO₂ por hectare (kg CO₂/ha/ano), tendo em conta uma densidade de plantação de 600 plantas/ha, no tratamento MS, a taxa de fixação foi de 3,59 kg CO₂/ha/ano, no tratamento MC, foi ligeiramente inferior: 2,96 kg CO₂/ha/ano. Esse resultado confirma que o tratamento MS favorece uma maior fixação de CO₂ também em superfície.

Tabela 1– Valores médios de Taxa de Fixação de CO₂ por planta e hectare de Medronheiro (obtidos a partir dos dados de Biomassa (p.s.)).

		Taxa de fixação de CO ₂ (gramas CO ₂ X planta X ano)		Densidade de plantação (nº plantas /ha)	Taxa de fixação de CO ₂ (quilogramas CO ₂ X ha X ANO)
Número amostral	Tratamento	Média	Desvio padrão	-	-
25	MS	5,98	2,10	600	3,59
25	MC	4,93	2,35	600	2,96

4.5. Nutrientes

Os resultados de nutrientes das folhas de Medronheiro (Tabela 2), expressos em g/Kg para macronutrientes e em mg/Kg para micronutrientes, mostram que o MC apresenta valores mais elevados de Ca, K, P, Cu, Fe e Zn em relação a MS. MS por sua vez tem ligeiramente mais Mg e Na. O teor de C total é muito próximo nos dois tratamentos, mas o teor de N total é maior em MC.

Tabela 2 – Valores médios dos macronutrientes expressos em g/Kg e micronutrientes expressos em mg/Kg em plantas de Medronheiro nos dois tratamentos (MS e MC), expressos em mg/Kg.

Tratamento		Ca	Mg	Na	K	P	N total	Cu	Fe	Mn	Zn	C total
		g/Kg						mg/Kg				
MS	Média	10,404	2,941	0,257	3,900	1,540	11,763	5	38	10	71	500,471
MC		17,557	2,563	0,231	5,993	2,241	13,653	12	50	11	74	496,568
MS	Desvio padrão	0,070	0,001	0,038	0,040	0,165	1,27	2	26	4	9	4,543
MC		0,557	0,024	0,021	0,372	0,253	0,372	13	44	5	16	7,884

Na figura 17 observa-se que, dos macronutrientes analisados (Ca, Mg, Na, K, P), o cálcio (Ca) domina nas folhas em ambos os tratamentos, sendo que o MC mobilizou em maior proporção (61%) seguido de MS (55%). Essa predominância de Ca é essencial para a integridade estrutural das paredes celulares e estabilidade das membranas (Brackmann & Ribeiro, 1992; Kabir & Díaz-Pérez, 2025). Já o Mg, apresentou maior proporção no tratamento MS (15%) do que MC (9%), e de acordo com Tränkner et al. (2016), o Mg é o componente central da molécula de clorofila, participando diretamente da fotossíntese e do metabolismo energético. Assim, sua maior concentração em MS pode ter contribuído para a maior fixação de CO₂. Enquanto o K, P e Na mantiveram a mesma proporção nos dois tratamentos (21%, 8% e 1% respetivamente). Assim como Mg, o K também tem a sua participação no processo de fotossíntese, ou seja, na ativação de enzimas do metabolismo fotossintético e envolvido na regulação osmótica (Cui & Tcherkez, 2021).

Já os micronutrientes analisados (Cu, Fe, Mn, Zn) (Figura 18) demonstraram que, o Zn é o micronutriente que a planta mais mobilizou nos dois tratamentos, sendo a proporção maior em MS (57%) seguido de MC (50%). O ferro (Fe) aparece em segundo lugar, sendo

mais elevado no MC (34%) do que, no MS (31%). MC tem mais Cu e Fe proporcionalmente, enquanto MS tem mais Zn.

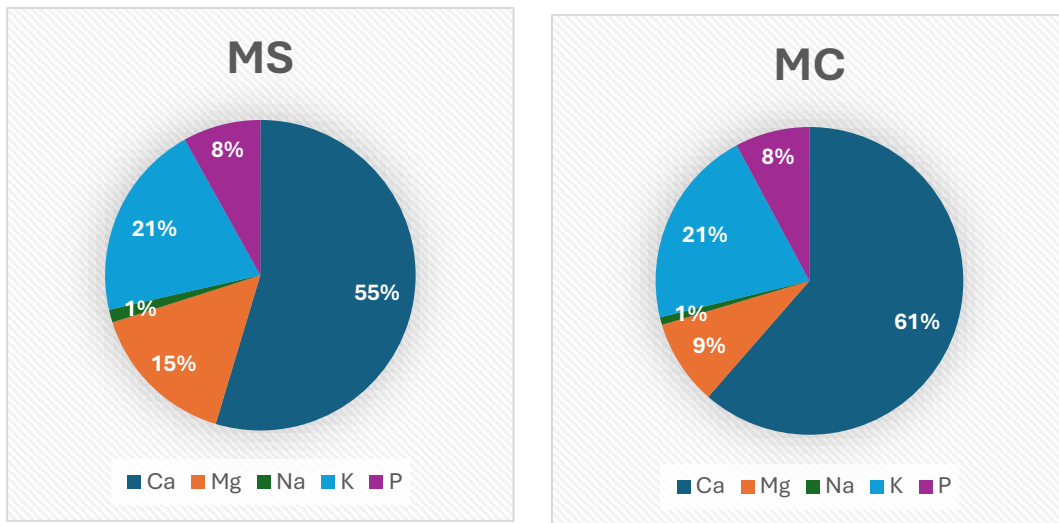


Figura 17: a) Valores médios dos macronutrientes (em %) em plantas de Medronheiro do tratamento MS, em comparação com b) os valores do tratamento MC.

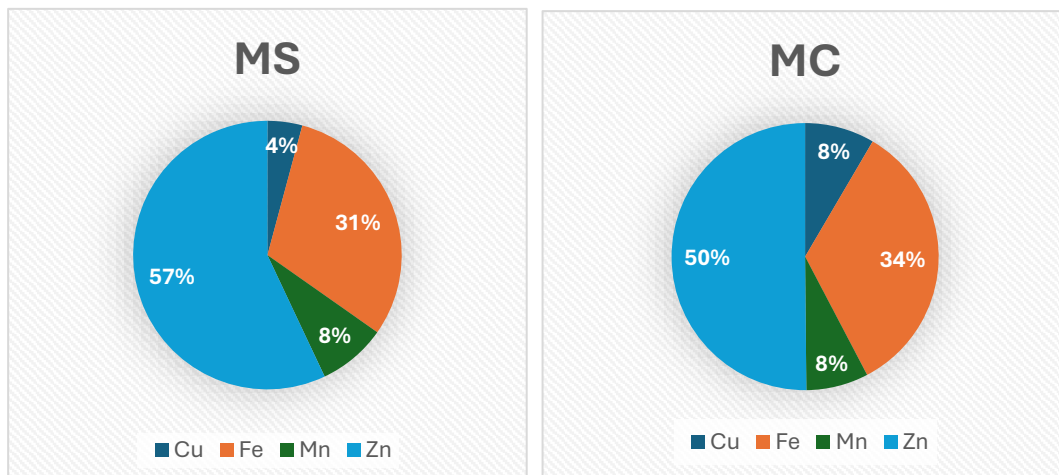


Figura 18: a) Valores médios (em %) dos micronutrientes em plantas de Medronheiro do tratamento MS, em comparação com b) os valores do tratamento MC.

4.6. Modelação do crescimento de Medronheiro

Os modelos representados nas figuras 19 e 20, descrevem a dinâmica do crescimento do Medronheiro sob a influência das variáveis abióticas (temperatura variável e água constante), bem como dos parâmetros de crescimento (altura, número de folhas, biomassa), assim como o contributo das plantas a fixação de CO₂ ao longo do tempo.

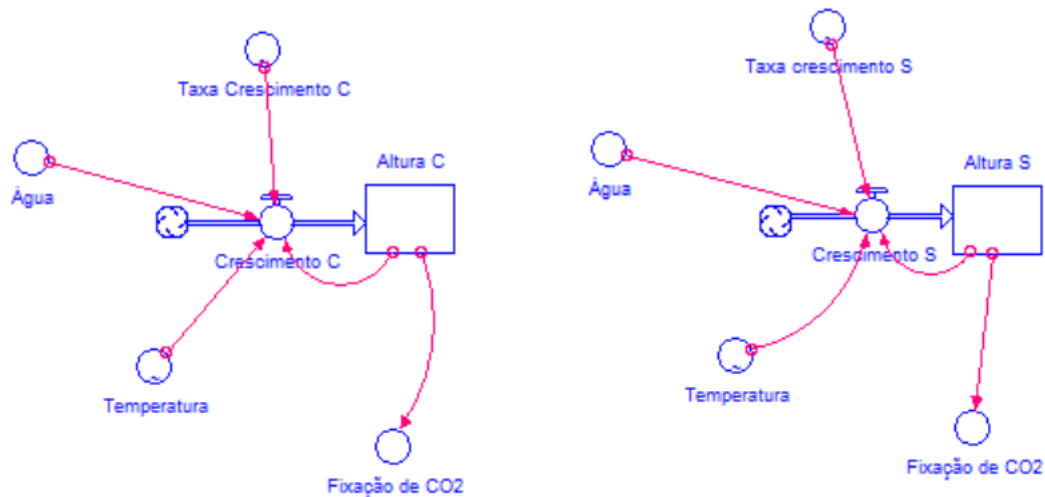


Figura 19: a) Modelo de crescimento do Medronheiro em função da altura para o MC b) Modelo de crescimento do Medronheiro em função da altura para o MS.

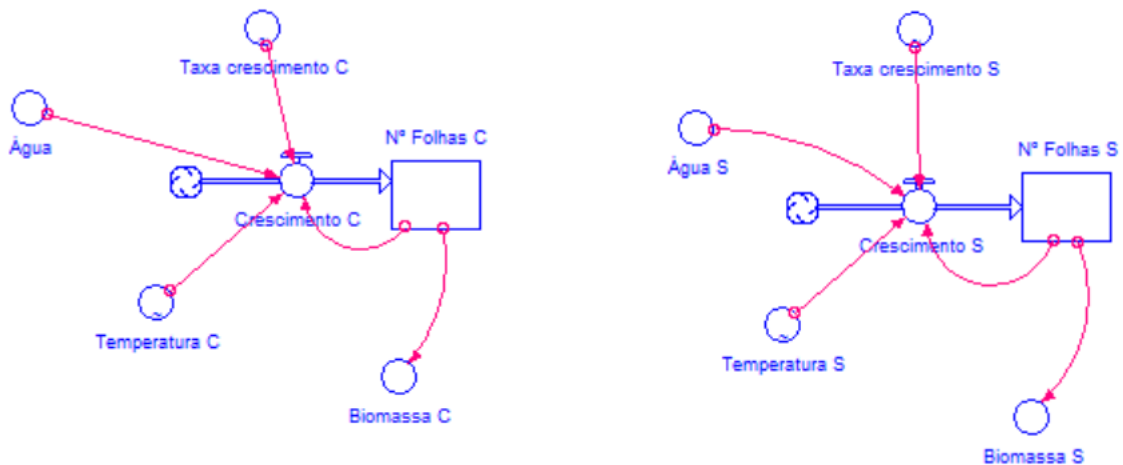


Figura 20: a) Modelo de crescimento do Medronheiro em função de número de folhas para o MC b) Modelo de crescimento do Medronheiro em função de número de folhas para o MS.

Para desenvolver os modelos de crescimento de plantas jovens de *Arbutus unedo* dos dois tratamentos: MC e MS, (Anexo 7 - Figuras 15, 16 e 17), utilizou-se os dados das medições experimentais realizadas previamente; essas medições incluem as variáveis biométricas: altura das plantas e número de folhas, bem como o registo da temperatura diária e o volume diário de água. Os modelos foram simulados num intervalo de tempo de 140 a 365 dds para as alturas dos dois tratamentos e de 41 a 370 dds para o número de folhas, correspondendo os dias iniciais da medição (41 e 140) e os dias finais (365 e 370).

4.6.1. Fase calibração do modelo

Os resultados obtidos dos modelos mostram boa correspondência com os dados reais obtidos das medições feitas (Anexo 7 - Tabelas 2 e 3), validando a coerência das equações e os parâmetros utilizados nos modelos.

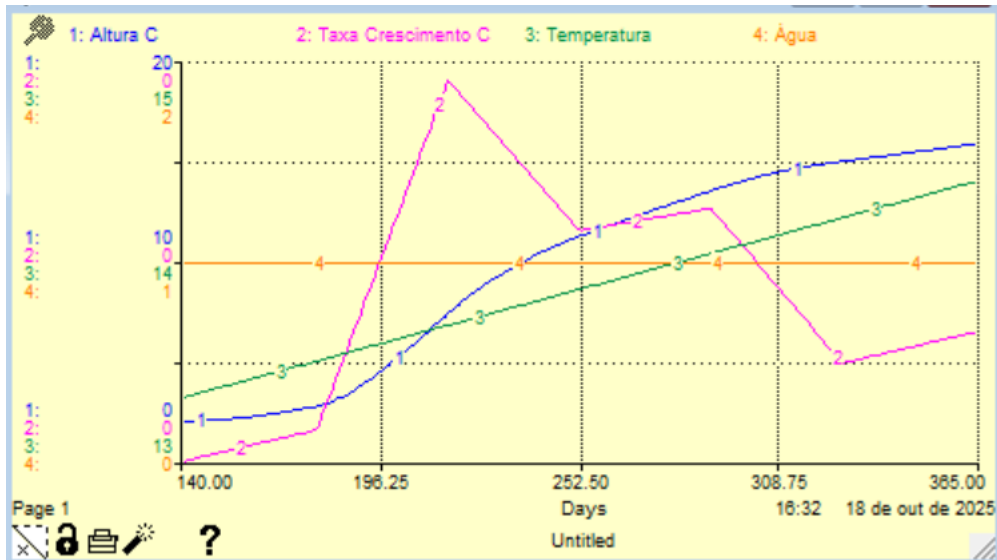


Figura 21: Resultado de altura do tratamento MC no intervalo de 140 a 365 dias, em relação à taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.

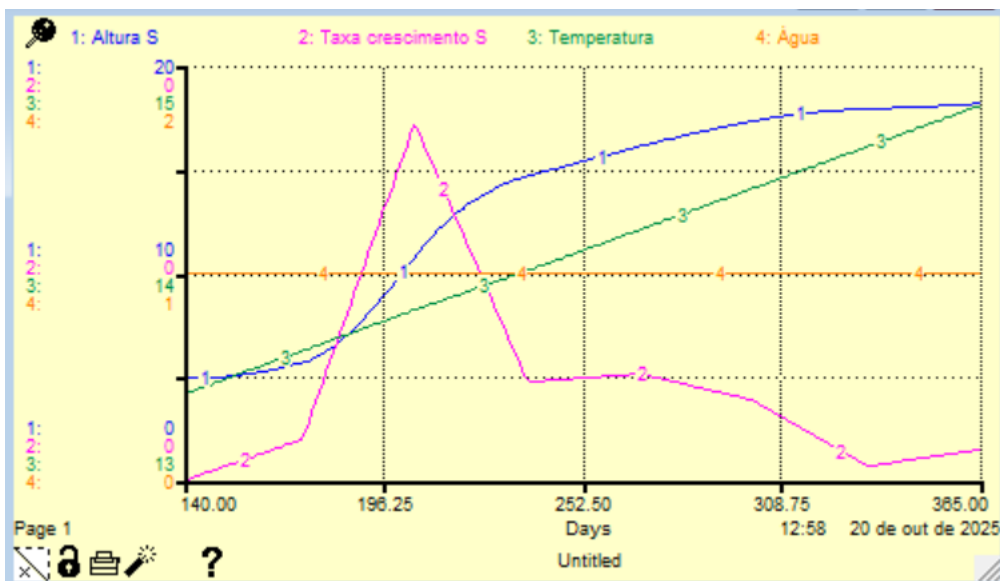


Figura 22: Resultado de altura no tratamento MS no intervalo de 140 a 365 dias, em relação à taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.

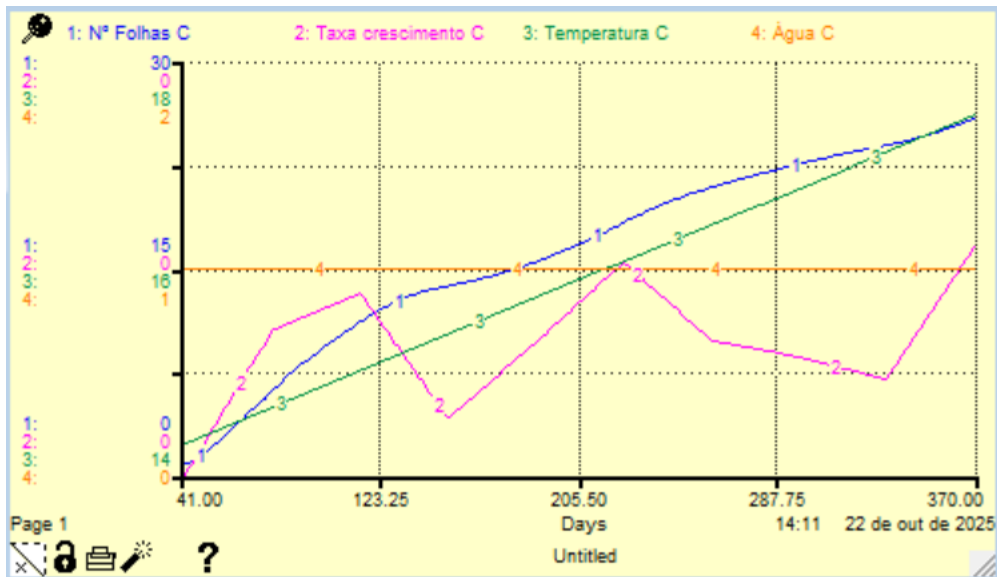


Figura 23: Resultado de número de folhas do tratamento MC num intervalo de tempo de 41 a 370 dias, em relação à taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.

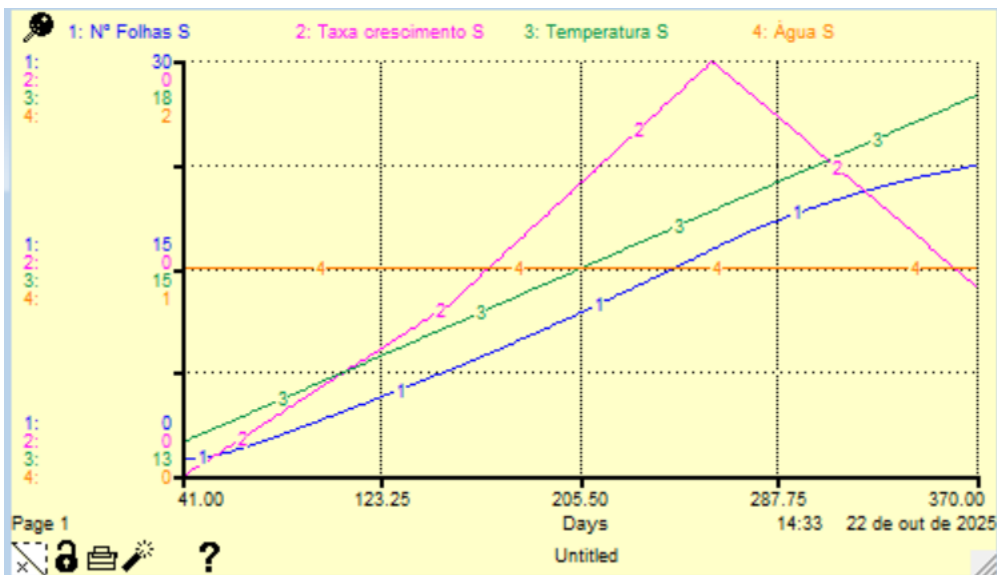


Figura 24: Resultado de número de folhas do Tratamento MS no intervalo de 41 a 370 dias, em relação à taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.

Conforme se observa nas figuras 21, 22, 23 e 24, os valores simulados acompanham de forma consistente as tendências observadas nas medições reais. Para a variável altura, o modelo estimou valores finais de aproximadamente 16 cm para o tratamento MC e 18 cm para o tratamento MS. No que respeita ao número de folhas, obteve-se uma média de 26 folhas para o tratamento MC e 22 folhas para o tratamento MS ao longo do período de monitorização, demonstrando assim ser adequado para descrever o comportamento observado. Também se pode observar nos gráficos tanto para altura como número de folhas um crescimento contínuo (visto que as plantas estão na sua fase de crescimento),

acompanhado por variações na taxa de crescimento, influenciadas pelas condições de temperatura crescente e pelo volume de água diário (que é uma constante de 1 mm/dia).

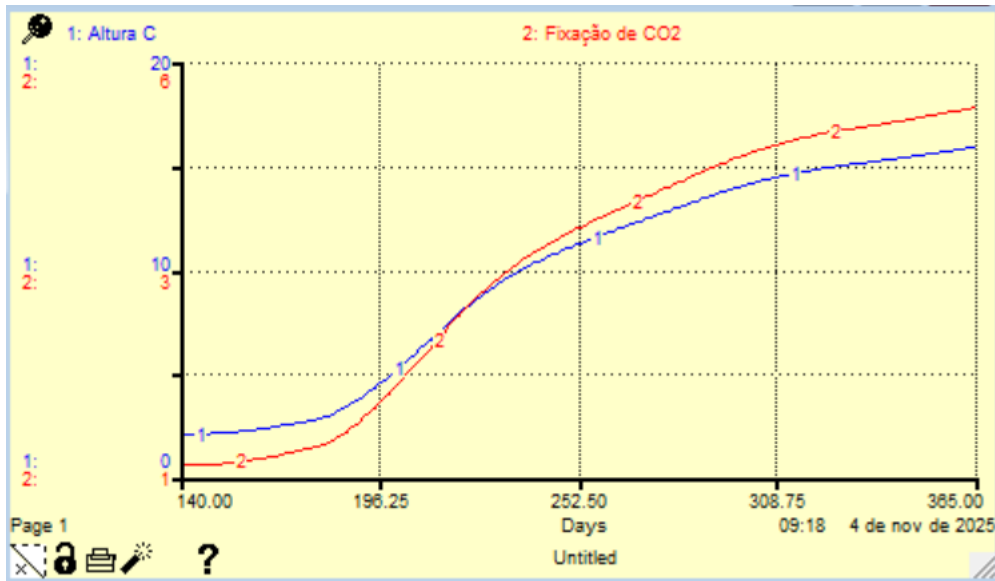


Figura 25: Resultados da relação entre a altura das plantas e a fixação de CO₂ do tratamento MC entre 140 e 365 dias.

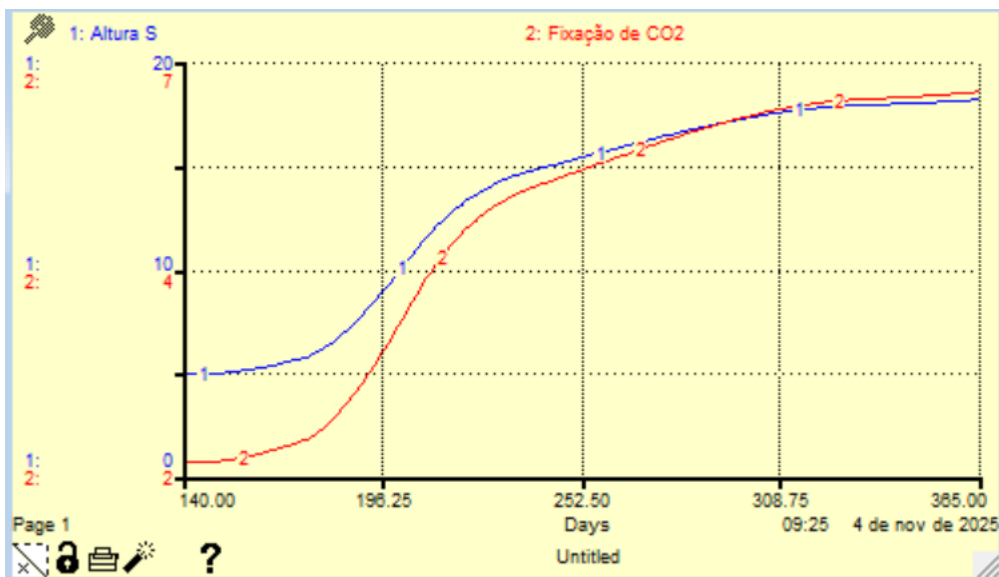


Figura 26: Resultados da relação entre a altura das plantas e a fixação de CO₂ do tratamento MS entre 140 e 365 dias.

As figuras 25 e 26 evidenciam uma relação positiva e crescente entre a altura das plantas e a fixação de CO₂ durante o período de crescimento (140 a 365 dias). Verifica-se que a taxa média de fixação de CO₂ foi superior no tratamento MS (6 g/planta/ano), com uma altura média de 18 cm, em comparação com o tratamento MC (5 g/planta/ano) e uma altura média de 16 cm. Os resultados das simulações estão em concordância com os

resultados obtidos, confirmando que o tratamento MS promoveu maior crescimento em altura e a capacidade de assimilação de C.

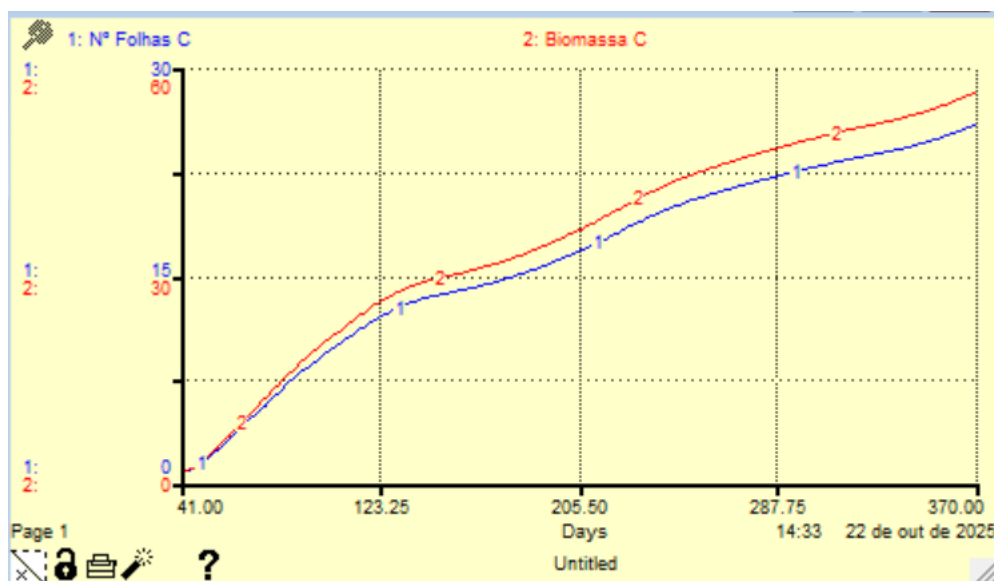


Figura 27: Resultado da relação entre Número de folhas e biomassa do tratamento MC entre 41 e 370 dias.

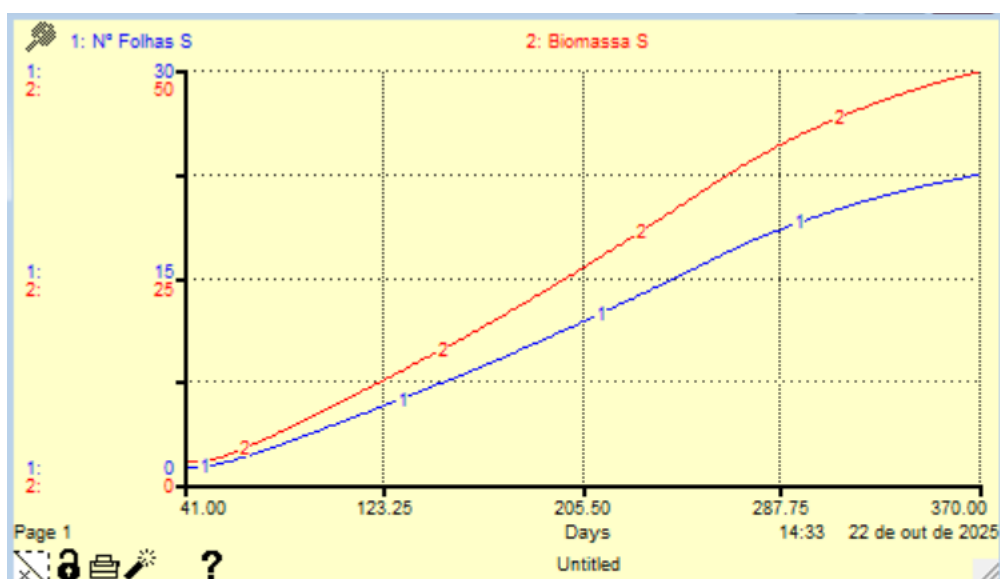


Figura 28: Resultado da relação entre Número de folhas e biomassa do tratamento MS entre 41 e 370 dias.

Os resultados das figuras 27 e 28 apresentam a relação entre o número de folhas e a biomassa dos tratamentos MC e MS, num intervalo de 41 a 370 dias, demonstrando uma tendência de crescimento contínuo, em que a biomassa acompanha o comportamento de número de folhas. Verifica-se que a média de número de folhas foi superior no tratamento MC (26 folhas) em comparação com o tratamento MS (22 folhas) e que a biomassa das folhas também foi maior no tratamento MC (57%) face ao tratamento MS (50%). Os

resultados das simulações estão em concordância com os resultados obtidos, uma vez que o aumento de número de folhas está associado ao acúmulo de matéria seca, resultando no crescimento simultâneo da biomassa.

Importa, no entanto, referir que estes modelos não foram validados, uma vez que foram utilizados exclusivamente com os dados experimentais obtidos na estufa do IPB e não foi identificada literatura com valores comparáveis de altura ou número de folhas para *Arbutus unedo* que permitisse uma validação independente. Deste modo, os resultados apresentados devem ser interpretados como uma representação coerente do comportamento observado, ainda que sem confirmação externa através de fontes bibliográficas.

4.6.2. Fase projeção do modelo

Após a fase experimental em condições controladas, as plântulas de Medronheiro foram transplantadas individualmente para outros vasos (de maior calibre). Depois de 132 dias, fez-se novamente as medições de altura e de número de folhas; com esses dados serviu-se fazer a projeção do modelo e depois comparar os valores simulados com os dados observados, a fim de avaliar a sua correspondência com os dados reais.

As Figuras 29, 30, 31 e 32, apresentam os resultados obtidos na fase de projeção do modelo. Observa-se que a altura projetada para o tratamento MC foi de 19 cm e, para o tratamento MS, de 20 cm, enquanto o valor observado foi de 23 cm, sem distinção entre tratamentos. Com base nestes valores, a percentagem de acerto do modelo foi de 82% para o tratamento MC e 87% para o tratamento MS. Estes resultados indicam que o modelo descreveu de forma coerente o padrão geral de crescimento previamente registado. No que se refere ao número de folhas, o modelo projetou uma média de 34 folhas para o tratamento MC e de 26 folhas para o tratamento MS, sendo o valor observado de 29 folhas, igualmente sem distinção de tratamento. A percentagem de acerto obtida foi de 83% para o tratamento MC e de 89% para o tratamento MS. Tal como na variável altura, estas aproximações indicam que o modelo retrata tendências globais do desenvolvimento das plantas, mas não tem como finalidade antecipar valores futuros com precisão.

Por exemplo, Lyra et al. (2008), ao modelarem o crescimento do milho BR 106 utilizando funções logísticas e exponenciais, também verificaram boa correspondência entre os dados observados e simulados, demonstrando que modelos matemáticos bem

parametrizados são capazes de representar adequadamente o crescimento das plantas. Assim, a aproximação obtida no presente estudo reforça a adequação das equações utilizadas e que a modelação aplicada possui boa capacidade para descrever o crescimento do Medronheiro.

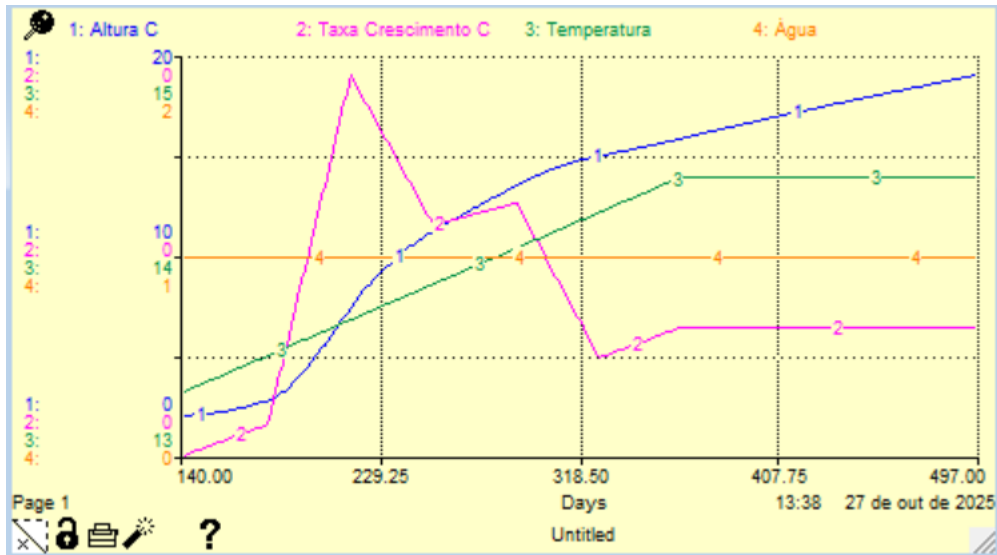


Figura 29: Projeção da altura das plantas no tratamento MC entre 140 e 497 dias, em função da taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.

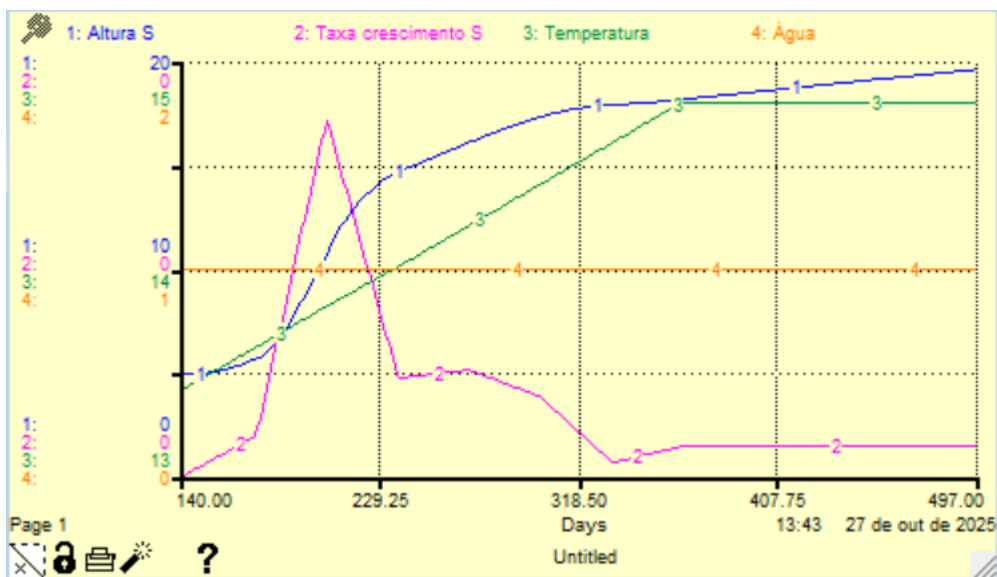


Figura 30: Projeção da altura das plantas no tratamento MS entre 140 e 497 dias, em função da taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.

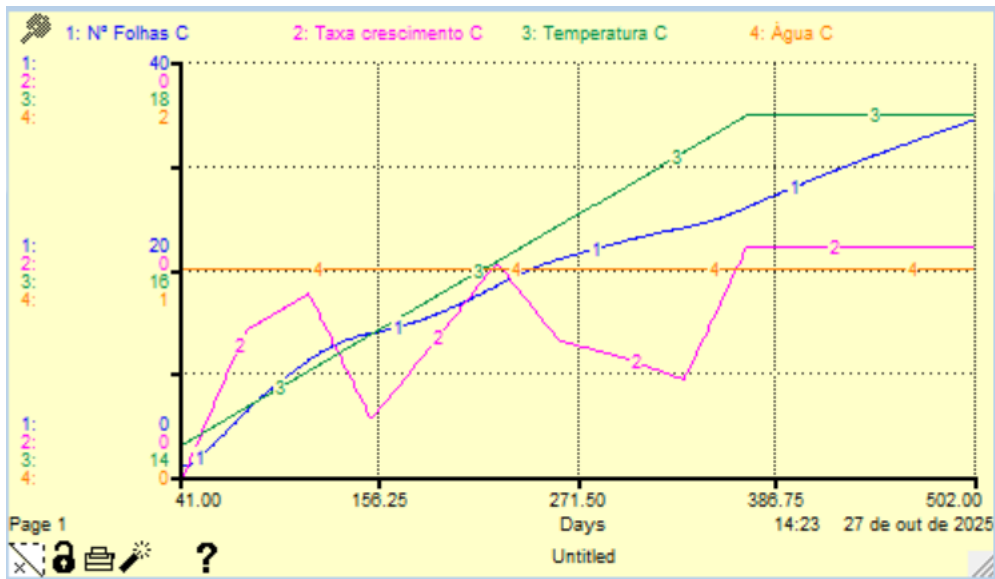


Figura 31: Projeção de número de folhas do tratamento MC entre 41 e 502 dias, em função da taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.

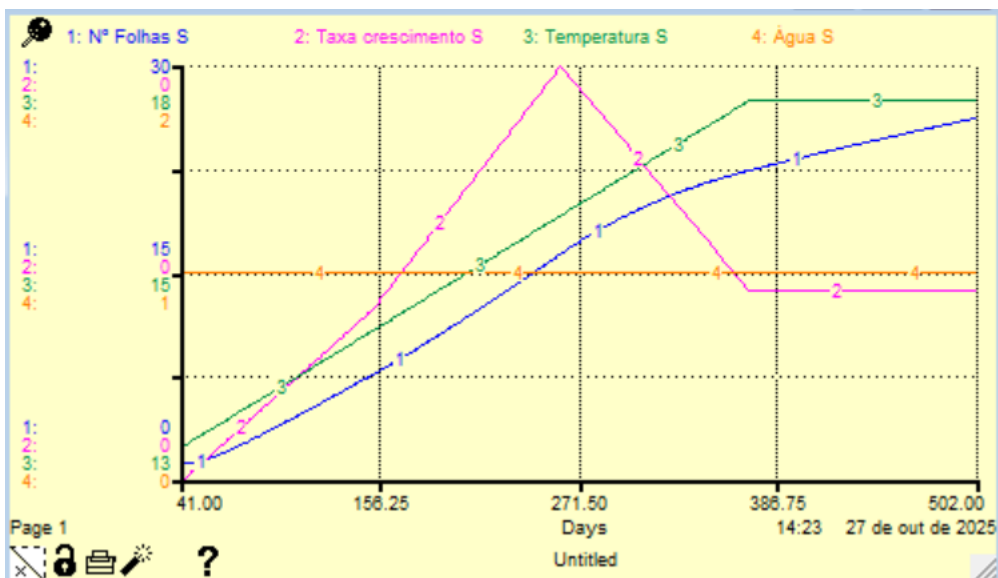


Figura 32: Projeção de número de folhas do tratamento MS entre 41 e 502 dias, em função da taxa de crescimento, temperatura e disponibilidade de água.

Seção 2: *Monitorização de nível de vitalidade em plantas jovens de Medronheiro (em campo)*

4.7. Monitorização de nível de vitalidade do Medronheiro em campo

A monitorização de nível de vitalidade de plantas jovens de Medronheiro em campo foi realizada nos meses de junho (antes de verão) e setembro (após verão) de 2024, conforme descrito previamente. Esta monitorização também permitiu avaliar o desenvolvimento

das espécies em diferentes parcelas de plantação, com diferente orientação topográfica (N-S, E-W), e o seu crescimento em função da altura e número de folhas.

Conforme a Ficha de campo (Anexo 2 - Figura 2), para avaliar o nível de vitalidade (NV) da espécie, foram determinados com base em seis categorias: 0% (planta completamente morta), 15% (vitalidade muito baixa, < 25% folhas verdes), 25% (vitalidade baixa, entre 25-50% folhas verdes), 50% (vitalidade moderada, entre 50-75% folhas verdes), 75% (vitalidade elevada, > 75% folhas verdes) e 100% (planta totalmente viva, 100% folhas verdes). A Figura 33 ilustra algumas imagens com plantas que foram avaliadas de acordo com a classificação das categorias de vitalidade.



Figura 33: Fotografias das plantas jovens de Medronheiro (reflorestação em Lagos de Sabor, 2023-24) com diferentes níveis de vitalidade: a) planta com vitalidade moderada (50% das folhas verdes) b) planta com vitalidade elevada (75%) c) e planta totalmente viva (100%).

As parcelas de plantação na área de estudo estavam distribuídas em polígonos georreferenciados de forma sequencial de 1 a 6, bem como a sua orientação (Anexo 4 - Figura 3). As parcelas 1, 2 e 3 situam-se em zonas mais degradadas, com maior pedregosidade superficial, com maior declive, e com orientações Oeste, Noroeste e Sudeste, respetivamente; a parcela 4 está inserido num solo típico de florestas folhosas e também com declive com orientação a Noroeste; a parcela 5 caracteriza-se pela presença de olivais e com declividade moderada, com orientação a Noroeste; e já a parcela 6 encontra-se numa área com menor inclinação e com orientação a Noroeste. Esses solos são predominantemente Leptosolos, derivados de xisto e granito (Figueiredo, 2012), e tendo sofrido um incêndio florestal em 2013 (incêndio de Picões) o que contribui para as fracas características edáficas observada em campo.

Foram monitorizados em campo 87 e 200 indivíduos de plantas jovens de Medronheiro antes e após o verão de 2024, respetivamente, tendo sobrevivido um total de 158 plantas,

com independência de NV. Antes de verão, o número de plantas quantificadas foi menor dada a dificuldade de diferenciar-lhas de outras plantas de rápido crescimento (nomeadamente herbáceas) no terreno; problema que foi reduzido depois do verão.

Os resultados concernentes aos NV antes e depois de verão (Figura 34) indicam que, das 87 plantas monitorizadas antes de verão, aproximadamente 74% estavam totalmente vivas, apresentavam vitalidade elevada ou moderada, frente ao 26% que apresentavam sintomas de vitalidade baixa, muito baixa ou estavam completamente secas. Já os NV de Medronheiro depois de verão mostram que, das 200 plantas monitorizadas apenas 33% estavam totalmente vivas, apresentavam vitalidade elevada ou moderada, frente ao 10% que apresentavam vitalidade baixa ou muito baixa, destacando que 58% das plantas estavam completamente secas. Estes dados indicam uma elevada taxa de mortalidade depois de verão, sugerindo que as condições estivais, possivelmente marcadas por elevadas temperaturas e escassez de água, tiveram um impacto negativo na sobrevivência das plantas.

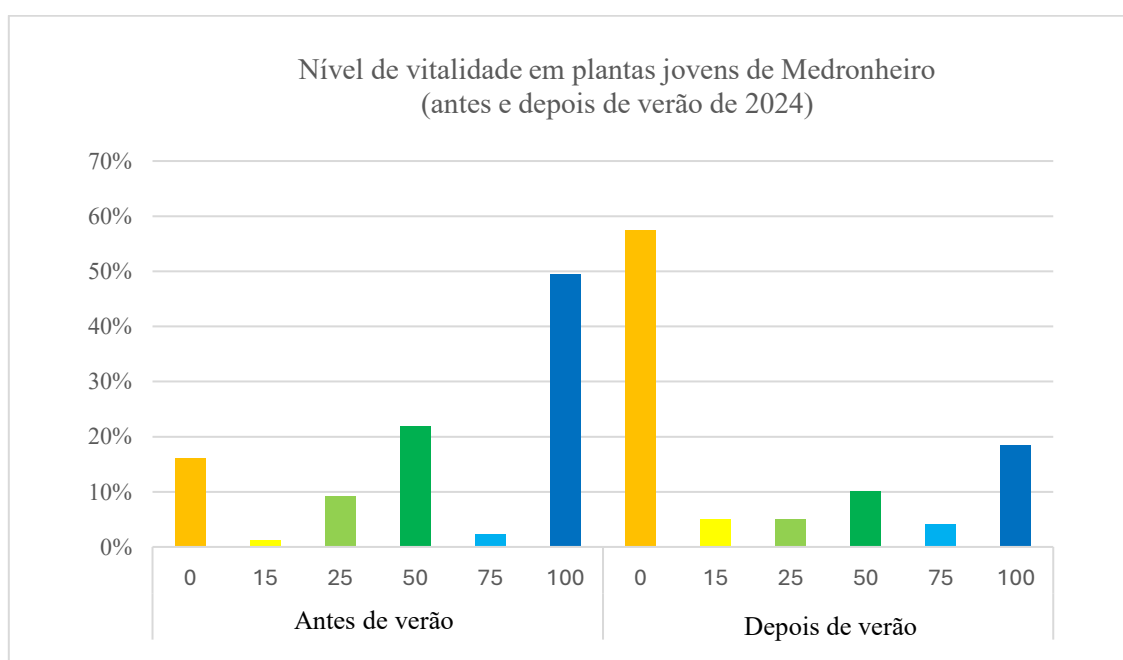


Figura 34: Nível de vitalidade de plantas jovens de Medronheiro antes e depois de verão de 2024 em Lagos de Sabor, expressada em seis categorias (0, 15, 25, 50, 75 e 100% plantas vivas).

Quanto as parcelas de amostragem, os dados totais indicam que, antes de verão na parcela 2 registou-se 75% das plantas totalmente vivas ou com vitalidade moderada e 25% das plantas mortas; na parcela 3, 86% totalmente vivas ou com vitalidade elevada e 14% com vitalidade baixa; na parcela 4, 39% das plantas estavam totalmente vivas, com vitalidade

elevada ou moderada, e 34% com vitalidade baixa, muito baixa, e 26% mortas; na parcela 5, 84% das plantas estavam totalmente vivas ou com vitalidade moderada, e 16% mortas; e na parcela 6, registou-se 100% das plantas totalmente vivas ou com vitalidade moderada (Figura 35).

Embora, depois de verão, na parcela 3, 12% das plantas estavam com vitalidade elevada ou moderada, 9% com vitalidade baixa ou muito baixa e 79% mortas; na parcela 4, 31% estavam totalmente vivas, com vitalidade elevada ou moderada, 8% com vitalidade baixa, ou muito baixa e 61% de plantas mortas; na parcela 5, 72% totalmente vivas ou vitalidade moderada, 28% vitalidade baixa ou muito baixa; e finalmente, na parcela 6, 71% das plantas estavam totalmente vivas ou com vitalidade elevada e apenas 29% com vitalidade moderada, não existindo plantas com baixa vitalidade ou mortas (Figura 35).

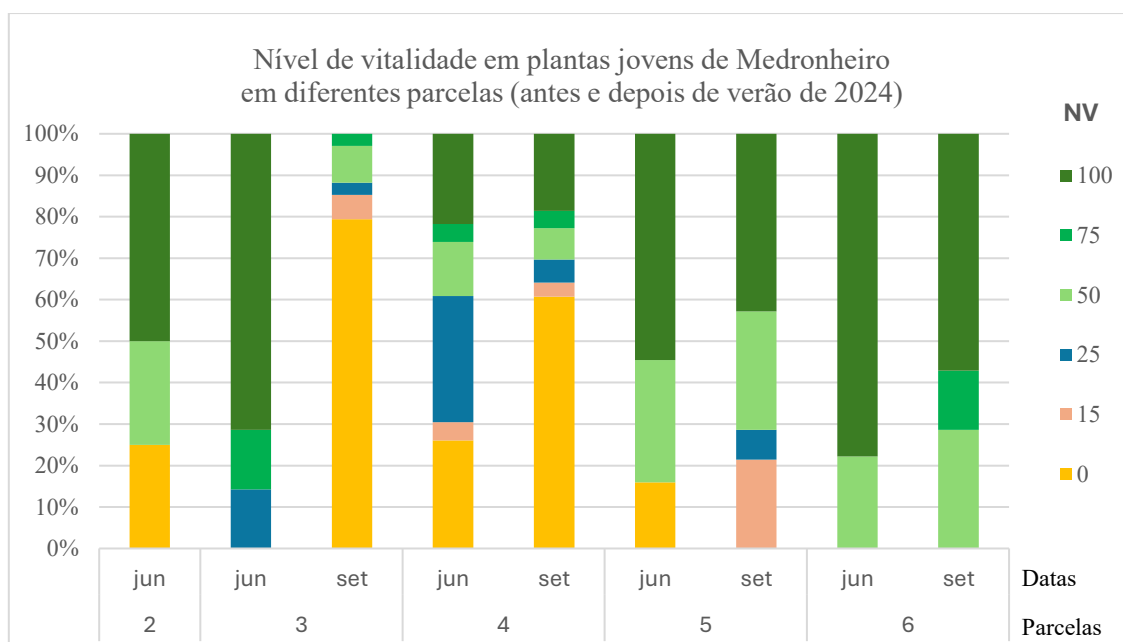


Figura 35: Nível de vitalidade de plantas jovens de Medronheiro em diferentes parcelas antes e depois de verão de 2024 em Lagos de Sabor, expressada em seis categorias (NV=0, 15, 25, 50, 75 e 100% plantas vivas) por parcela (2 - 6).

Os resultados finais de NV de plantas jovens, indicam que as parcelas 5 e 6 apresentaram maior sobrevivência (> 70%) em comparação as parcelas 3 e 4 (< 30%), independentemente da data de amostragem, apresentando percentagens significativamente mais elevados de valores médios de NV (Figura 36).

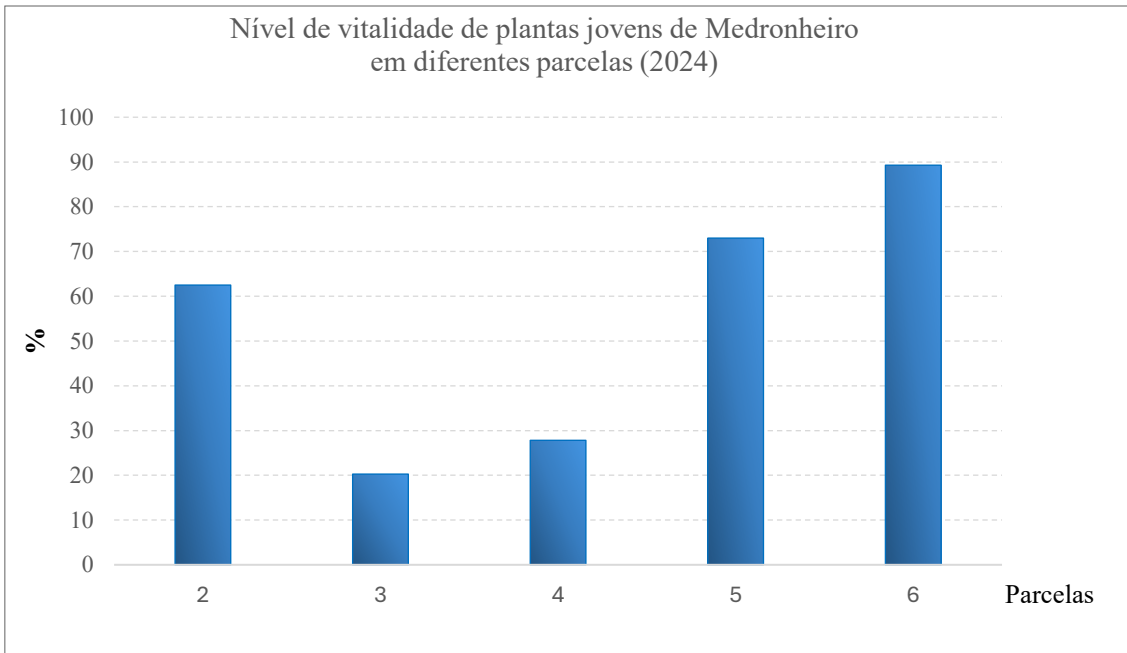


Figura 36: Nível de vitalidade de plantas jovens de Medronheiro em diferentes parcelas (2024) em Lagos de Sabor, expressada em valores médios de NV (%) por parcela (indicadas de 2 - 6).

Na Figura 37 apresentam-se os valores médios da altura das plantas (em centímetros), como indicador biométrico de desenvolvimento em campo. Como se pode observar, as plantas das parcelas 4, 5 e 6 tiveram maiores valores médios de altura. Já as plantas nas parcelas 2 e 3 apresentaram a menor altura média.

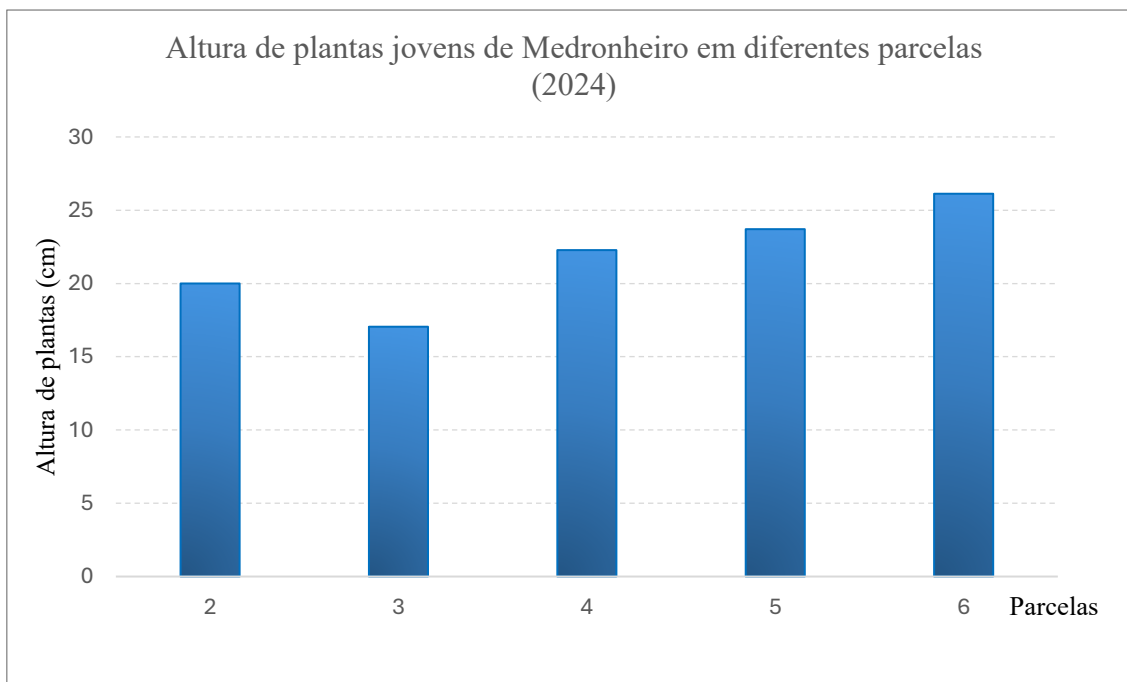


Figura 37: Valores médios de altura das plantas (em centímetros) por parcela (indicadas de 2 - 6) em plantas jovens de Medronheiro plantadas em 2024 em Lagos de Sabor.

E quanto aos resultados desta variável antes e depois de verão (Figura 38), observa-se um aumento significativo da altura média das plantas depois de verão, com independência de seu NV, o que indica que as plantas cresceram no período de junho a setembro. Assim, a taxa de crescimento média para plantas jovens de Medronheiro pode ser estimada em ~ 0,02 cm/dia.

Os dados obtidos revelam o impacto do verão na sobrevivência das plantas de Medronheiro evidenciando uma queda acentuada na taxa de vitalidade total (100%) de 50% (antes de verão) para 19% (depois de verão) e um aumento expressivo da mortalidade de 16% (antes de verão) para 58% (depois de verão), o que representa uma mortalidade de 42% entre os dois períodos de estudo. Este declínio indica que o período de verão é crítico, associado principalmente ao estresse hídrico, elevadas temperaturas e evapotranspiração, e à baixa adaptação das plantas as condições das parcelas em estudo. Esses fatores limitam a sobrevivência de plântulas em estágios iniciais de estabelecimento. Estudos prévios confirmam que o Medronheiro é sensível ao estresse hídrico durante os primeiros anos após a plantação, mesmo sendo uma espécie adaptada a ambientes mediterrânicos (Santiso & Retuerto, 2017; Vasques et al., 2013).

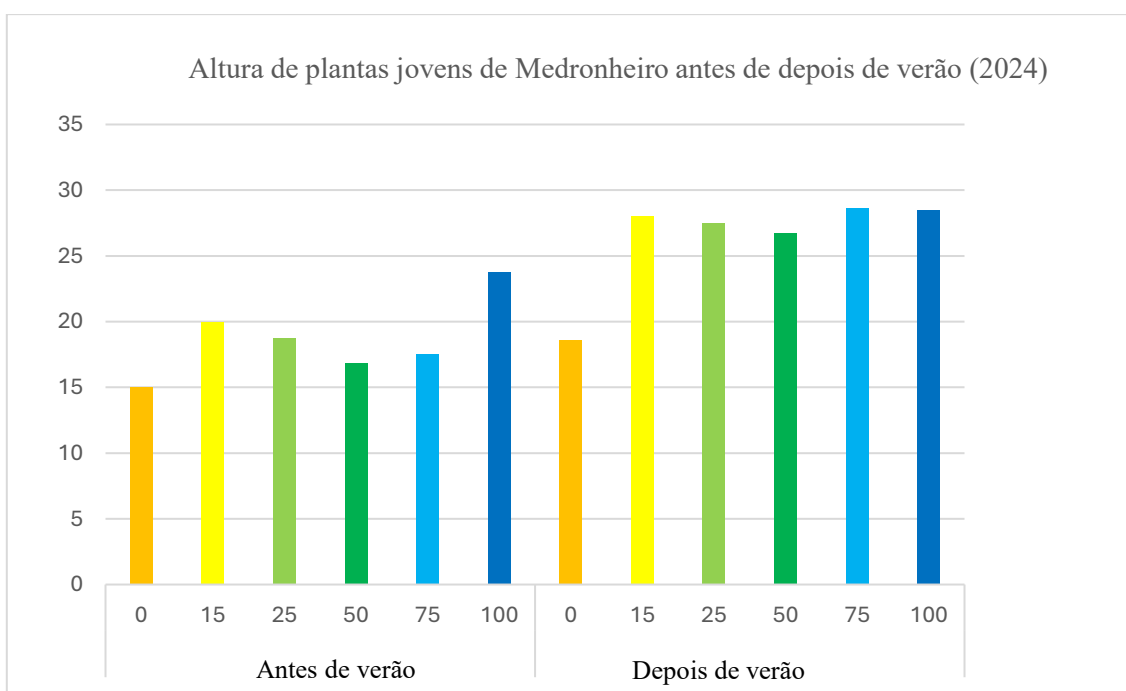


Figura 38: Valores médios da altura (em centímetros) de plantas jovens de Medronheiro antes e depois de verão de 2024 em Lagos de Sabor, ordenados por diferentes níveis de vitalidade (0, 15, 25, 50, 75 e 100% plantas vivas).

Ainda sobre os resultados, observa-se uma diminuição nas categorias intermediárias de NV (baixa a moderada), sugerindo que muitas plantas que inicialmente apresentavam sinais de vitalidade, não conseguiram manter-se vivas ao final do verão. A percentagem de indivíduos com vitalidade elevada, por exemplo, saiu de 2% para 4%, mas considerando o aumento do número total de plantas avaliadas, isso representa um número total ainda muito reduzido. Por fim, é importante considerar que a diferença no número de plantas monitorizadas entre as duas amostragens de campo, de 87 para 200 pode influenciar a interpretação dos dados totais, mas as proporções indicam de forma consistente, um agravamento do estado geral das plantas depois de verão.

Quanto as parcelas, os impactos do verão também são evidenciados destacando que o local 3 com orientação a Sudeste, sendo também uma área com elevada pedregosidade superficial, e com declive acentuado, sofreu o maior declínio passando de 72% de plantas totalmente vivas antes de verão para 79% de plantas mortas depois de verão. A parcela 4 apresentou mortalidade em ambos períodos, passando de 26% para 61%. A parcela 5 demonstrou maior resiliência relativa, apesar de uma redução de 55% para 43% de plantas totalmente vivas, manteve bons níveis de vitalidade moderada e, ainda que teve uma mortalidade de 16% antes de verão, apenas apresentou indivíduos com vitalidade muito baixa depois de verão (21%) e nenhuma mortalidade, indicando condições melhores de sobrevivência que a parcela 3 e 4. Parcela 6, com declive pouco acentuado, destacou-se como a parcela mais favorável, embora tenha havido um decréscimo de 78% para 57% nas plantas totalmente vivas, manteve sempre algum nível de vitalidade, não registrando nenhuma mortalidade. Finalmente, para a parcela 2 apenas temos dados para antes de verão, mas já se apresentava 25% de mortalidade, o que sinaliza um início com condições desfavoráveis. Liang et al. (2023), analisam como variáveis topográficas (posição do talude, declive, exposição) e propriedades do solo afetam a regeneração natural e a reflorestação, mostrando que a posição de encosta altera a acumulação de humidade e sedimentos, afetando a sobrevivência das plantas.

Os resultados da variável morfológica altura das plantas mostram que, apesar do aumento da mortalidade e do declínio na vitalidade, houve um crescimento médio positivo entre ambos períodos de estudo. A altura média das plantas monitorizadas aumentou em todas as categorias de NV, o que sugere que as plantas sobreviventes mantiveram algum nível de desenvolvimento, mesmo sob condições adversas de verão. A taxa média de crescimento registada foi de 0,02 cm/dia para o período estival, valor compatível com as

características da espécie de Medronheiro, conforme descrito por Martins & Canhoto (2024), refletindo o seu perfil de crescimento lento.

Estudos desenvolvidos por Vasques et al. (2013), demonstraram que o baixo teor de água tem efeitos negativos sobre a biomassa aérea do Medronheiro em estágios iniciais de desenvolvimento.

Por outro lado, no estudo de Martins et al. (2022), foi observada uma variabilidade significativa na tolerância à seca entre diferentes genótipos de plantas de Medronheiro, indicando que a origem genética das plantas influencia sua capacidade de resistir ao estresse hídrico. Neste estudo, todos os frutos (dos quais se obtiveram posteriormente as sementes) foram recolhidos na mesma data e área de estudo, não afetada pelo grande incêndio de Picões, de forma a garantir a menor variabilidade genética na população vegetal em estudo.

5. Conclusões

O tratamento MC-composto de bagaço de azeitona (MC) demonstrou ser uma SbN viável, promovendo uma boa germinação, um bom desenvolvimento foliar e uma maior eficiência no uso da água em plantas de Medronheiro (*Arbutus unedo*), em comparação com um substrato comercial (MS), características essenciais para a resiliência das plantas em ambientes mediterrânicos.

Os resultados demonstram que a SbN-Composto (MC), em particular, influencia positivamente na taxa de crescimento, embora o tratamento MS tenha apresentado valores superiores nas variáveis biométricas altura e biomassa não assimilatória (talo), o que confirma a hipótese sobre que o aumento das taxas de crescimento em *Arbutus unedo* se deve à maior turgescência celular, provocada pela melhoria do potencial hídrico foliar, e não necessariamente a um aumento da fotossíntese ou a condutância foliar; o qual não impede que durante a seca estival, *Arbutus unedo* exiba um uso de água muito mais conservador.

O modelo de crescimento desenvolvido para plantas jovens de Medronheiro, com recurso ao software STELLA, demonstrou ser adequado como uma ferramenta descritiva do desenvolvimento das plantas, confirmando as tendências observadas nos ensaios em estufa, com o tratamento MS promovendo maior crescimento (altura e engrossamento do talo) e o MC maior número de folhas.

Contudo, a alta taxa de mortalidade observada em campo nos Lagos de Sabor, um ano depois da reflorestação, evidencia a vulnerabilidade das plantas jovens de Medronheiro, nomeadamente na fase estival (de junho a setembro), independentemente do substrato utilizado, embora dependente da orientação N-S ou E-W da encosta nas parcelas, sublinhando a necessidade de desenvolver boas práticas de conservação de água e solo nas ações de reflorestação em áreas previamente degradadas por incêndios florestais.

Importa salientar que os resultados deste trabalho se referem ao comportamento fisiológico das plantas de Medronheiro na fase inicial de crescimento (semente-plântula-planta jovem, até 1 ano), desenvolvidas em condições de estufa, assim como os níveis de vitalidade das plantas jovens após o primeiro ano de monitorização em campo. Assim, dados de monitorizações futuras (após 2 ou 3 anos da reflorestação) poderão revelar novas tendências e comportamentos fisiológicos à medida que as plantas vão crescendo e se adaptando às condições ambientais adversas.

Agradecimentos às entidades financiadoras:

À Camões, Instituto da Cooperação e da Língua, pelo financiamento da bolsa de estudo. Ao projeto ForestWaterUp- *Soluções baseadas na natureza para o restauro ecológico de solos degradados nos Lagos do Sabor*, financiado pelo Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização (POCI) – Iniciativa REACT-EU, Candidatura nº 13/ REACT-EU/2021, pelo financiamento de recursos para a realização dos trabalhos em estufa e no terreno. Ao Departamento de Serviços Florestais da Camara Municipal de Mogadouro, pelo apoio incondicional durante as visitas de campo. À empresa Floponor, responsável pela reflorestação, pela assistência prestada nos trabalhos de campo em 2024 e 2025.

6. Referências bibliográficas

- Albuquerque, J. A., González, J., García, D., & Cegarra, J. (2006). *Composting of a solid olive-mill by-product (“alperujo”) and the potential of the resulting compost for cultivating pepper under commercial conditions*. *Waste Management*, 26(6), 620-626.
- Alharbi, A., & Ghonimy, M. (2025). *Environmental Benefits of Olive By-Products in Energy, Soil, and Sustainable Management*. *Sustainability*, 17(10), 4722.
- APA, 2023. *Nota Técnica relativa a Biomassa RGGR e Biomassa REI*. https://apambiente.pt/sites/default/files/_Residuos/Producao_Gest%C3%A3o_Residuos/Nota%20T%C3%A9cnica%20-Biomassa%20vers%C3%A3o4%20.pdf
- Arevalo, L. A., Alegre, J. C., & Vilcahuaman, L. J. M. (2002). *Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra*.
- Balzano, A., Amitrano, C., Arena, C., Pannico, A., Caputo, R., Merela, M., ... & De Micco, V. (2025). *Does Pre-Acclimation Enhance the Tolerance of Quercus ilex and Arbutus unedo Seedlings to Drought?*. *Plants*, 14(3), 388.
- Batjes, N. H. (2014). *Total carbon and nitrogen in the soils of the world*. *European journal of soil science*, 65(1), 10-21.
- Bompastor, A., Figueiredo, T. D., & Fonseca, F. (2009). *Matos do Parque Natural de Montesinho, NE de Portugal: produção de serviços ecossistémicos*. In 15º Congresso da APDR (pp. 338-364). APDR.
- Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). *Temperature-associated increases in the global soil respiration record*. *Nature*, 464(7288), 579-582.
- Bowker, M. A., Belnap, J., Chaudhary, V. B., & Johnson, N. C. (2008). *Revisiting classic water erosion models in drylands: the strong impact of biological soil crusts*. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), 2309-2316.
- Canadell, J., & López-Soria, L. (1998). *Lignotuber reserves support regrowth following clipping of two Mediterranean shrubs*. *Functional Ecology*, 12(1), 31-38.
- Castell, C., & Terradas, J. (1994). *Effects of water and nutrient availability on water relations, gas exchange and growth rate of mature plants and resprouts of Arbutus unedo L*. *Annals of Botany*, 73(6), 595-602.

- Celikel, G., Demirsoy, L., & Demirsoy, H. (2008). *The strawberry tree (Arbutus unedo L.) selection in Turkey*. Scientia Horticulturae, 118(2), 115-119.
- Chaves, M. M., Pereira, J. S., Maroco, J., Rodrigues, M. L., Ricardo, C. P. P., Osório, M. L., Carvalho, I., Faria, T., & Pinheiro, C. (2002). *How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth*. Annals of botany, 89(7), 907.
- Coelho, I. S., Casau, F., Gomes, F., Botelho, G., Rodrigues, I., Dias, J., & Cabrita, S. (2017). *Medronheiro*.
- Coelho, L., Portela, C., Cravo, A., & Reis, M. (2009). *Valorização do bagaço de azeitona por compostagem, para utilização agrícola*. V Simpósio Nacional de Olivicultura, 14, 133-140.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN: Gland, Switzerland, 97, 2016-2036.
- Duarte, I. M., Rego, F. C., & da Fonseca, L. C. (2009). *Avaliação da regeneração da paisagem após incêndio de 2004 na serra do caldeirão*. Revista Portuguesa de Estudos Regionais, (20), 41-60.
- EBIC-Conselho Europeu da Indústria de Bioestimulantes. (2025). *O que são bioestimulantes?* <https://biostimulants.eu/faqs/what-are-biostimulants/>
- EC-European Commission. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fb117980-d5aa-46df-8edc-af367cdde202>.
- Ecology day. 2023. *Propagação e plantação de árvores mediterrânicas nos Lagos do Sabor: Prepara-te para plantar! Ciclo de formação continua (13 setembro 2023 a 19 março de 2025)*, IPB. <https://www.ecologyday.eu/programa>
- Falkowski, P. G. (2002). *The ocean's invisible forest*. Scientific American, 287(2), 54-61.
- Figueiredo, T. D. (2012). *Pedregosidade dos Solos em Trás-os-Montes: importância relativa e distribuição espacial*.

- Figueiredo, T. D., Fonseca, F., Hernandez Hernandez, Z., Royer, A. C., Santos, R., Okada, V., & Rodrigues, S. (2023). II Congresso Nacional das Ciências do Solo: livro das viagens de estudo. In *II Congresso Nacional das Ciências do Solo: Livro das Viagens de Estudo*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Figueiredo, T. de, Fonseca, F., Nunes, L., 2015. *Proteção do Solo e combate à desertificação*. Escola Superior Agrária, Bragança.
- Fraga, R. G., & Sayago, D. A. V. (2020). *Soluções baseadas na Natureza: uma revisão sobre o conceito*. *Parcerias Estratégicas*, 25(50), 67-82.
- García-Rández, A., Sánchez Méndez, S., Orden, L., Andreu-Rodríguez, F. J., Mira-Urios, M. Á., Sáez-Tovar, J. A., Martínez-Sabater, E., Bustamante M. A., Pérez-Murcia, M. D., & Moral, R. (2025). *Evaluation of Olive Mill Waste Compost as a Sustainable Alternative to Conventional Fertilizers in Wheat Cultivation*. *Agriculture*, 15(14), 1543.
- Godinho-Ferreira, P., Azevedo, A., & Rego, F. (2005). *Carta da tipologia florestal de Portugal Continental*. *Silva Lusitana*, 13(1), 1-34.
- Gratani, L., Varone, L., Ricotta, C., & Catoni, R. (2013). *Mediterranean shrublands carbon sequestration: environmental and economic benefits*. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(8), 1167-1182.
- Gugliuzza, G., Talluto, G., Giovino, A., & Lo Bianco, R. (2012). *Growth and biomass partitioning of *Arbutus unedo*, *Laurus nobilis*, *Phillyrea angustifolia* and *Rhamnus alaternus* seedlings under water deficit*. In II International Symposium on Woody Ornamentals of the Temperate Zone 990 (pp. 167-174).
- Hammami, I., Jellali, M., Ksontini, M., & Rejeb, M. N. (2005). *Propagation of the strawberry tree through seed (*Arbutus unedo*)*. *International Journal of Agriculture & Biology*, 7(3), 457-459.
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). *Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate*. *Frontiers in plant science*, 10, 103.
- Hernández, Z., Figueiredo, D., Royer, A. C., Fonseca, F., Almendros, G., & de Figueiredo, T. (2022). *Qualidade da matéria orgânica e perda de fitotoxicidade em estágios pro-gressivos da compostagem de bagaço de azeitona*. *Revista de Ciências Agrárias*, 45(4), 262-266.

Houghton, R. A., & Nassikas, A. A. (2017). *Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015*. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(3), 456-472.

ICNF. (2019). Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. *Inventário Florestal Nacional*. Disponível em: <https://www.icnf.pt/noticias/inventarioflorestalnacional>.

ICNF. (2024). Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. *Combater a desertificação na UE*. Disponível em: <https://www3.icnf.pt/noticias/combateradesertificacaonaue?>

INE. (2024). Instituto Nacional de Estatísticas – Portugal. Disponível em; https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0000705&selTab=tab0&xlang=pt.

Keiluweit, M., Bougoure, J. J., Nico, P. S., Pett-Ridge, J., Weber, P. K., & Kleber, M. (2015). *Proteção mineral do carbono do solo neutralizada por exsudatos radiculares*. *Natureza Mudanças Climáticas*, 5(6), 588-595.

Konstantinidis, P., Tsiourlis, G., & Xofis, P. (2006). *Efeito da estação do fogo, aspecto e tamanho da planta pré-fogo sobre o crescimento de rebrotas de Arbutus unedo L. (medronheiro)*. *Ecologia e Manejo Florestal*, 225(1-3), 359-367.

Lal, R. (2004). *Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security*. *science*, 304(5677), 1623-1627.

Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *Carbono orgânico do solo: o potencial oculto*.

Liang, W., Feng, Y., Li, F., Zhao, Y., Zhu, J., Yao, J., Chang, C., & Wei, X. (2023). *Drivers of vegetation and soil determine natural regeneration of a single plantation at different slope positions*. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1167284.

Liodakis, S., & Kakardakis, T. (2008). *Measuring the relative particle foliar combustibility of WUI forest species located near Athens*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 93(2), 627-635.

Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). *Estabilização da matéria orgânica em solos*

temperados: mecanismos e sua relevância em diferentes condições de solo – uma revisão. Revista Europeia de Ciência do Solo, 57(4), 426-445.

Lyra, G. B., Souza, J. L., Lyra, G. B., Teodoro, I., & Moura Filho, G. (2008). *Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR 106, em três épocas de plantio.* Revista Brasileira de Milho e Sorgo, 7(03).

Maestre, F. T., Bowker, M. A., Cantón, Y., Castillo-Monroy, A. P., Cortina, J., Escolar, C., Martínez, I. (2011). *Ecology and Funcional Roles of Biological Soil Crusts in Semi-Arid Ecosystems of Spain.*

Maisto, G., Vitale, L., Santorufo, L., Memoli, V., Vitale, E., Santini, G., ... & Arena, C. (2025). *Suitability of two different organic substrates as growing media for sustaining the productivity of mediterranean plant species in degraded sites.* Environmental Sustainability, 8(3), 533-548.

Marques, T. H. N., Rizzi, D., Ferraz, V., & Herzog, C. P. (2021). *Soluções baseadas na natureza: conceituação, aplicabilidade e complexidade no contexto latino-americano, casos do Brasil e Peru.* Revista LABVERDE, 11(1), 12-49.

Martins, J., & Canhoto, J. (2024). *Medronheiro.* Revista de Ciência Elementar, 12(1).

Martins, J., Pétriacq, P., Flandin, A., Gomez-Cadenas, A., Monteiro, P., Pinto, G., & Canhoto, J. (2022). *Genotype determines Arbutus unedo L. physiological and metabolomic responses to drought and recovery.* Frontiers in plant science, 13, 1011542.

Mesléard, F., & Lepart, J. (1991). *Germination and seedling dynamics of Arbutus unedo and Erica arborea on Corsica.* Journal of Vegetation Science, 2(2), 155-164.

Mohammed El Haouari, José J. López, Hassane Mekhfi, Juan A. Rosado, Ginés M. Salido. (2007). *Antiagregant effects of Arbutus unedo extracts in human platelets.* Journal of Ethnopharmacology, Volume 113, Issue 2, Pages 325-331.

Motta, R. S. D., Ferraz, C., Young, C. E. F., Austin, D., & Faeth, P. (2000). *Mecanismo de desenvolvimento limpo e o financiamento do desenvolvimento sustentável no Brasil.*

Navarro García, A., del Pilar Bañón Árias, S., Morte, A., & Sánchez-Blanco, M. J. (2011). *Effects of nursery preconditioning through mycorrhizal inoculation and drought in Arbutus unedo L. plants.* Mycorrhiza, 21(1), 53-64.

Niaounakis, M., & Halvadakis, C. P. (2006). *Gestão de resíduos de processamento de azeitona: revisão de literatura e levantamento de patentes*.

Niklas, K. J., & Enquist, B. J. (2001). *Invariant scaling relationships for interspecific plant biomass production rates and body size*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(5), 2922-2927.

NIR. (2023). *National Inventory Report - Portugal*. Agência Portuguesa do Ambiente. Disponível em: https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Inventarios/20230404/NIR202315%20A pril.pdf.

ODS. (2022). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 17 objetivos para um mundo mais sustentável e justo*. Disponível em: <https://ods.pt/>.

Ogaya, R., Peñuelas, J., Martínez-Vilalta, J., & Mangirón, M. (2003). *Effect of drought on diameter increment of Quercus ilex, Phillyrea latifolia, and Arbutus unedo in a holm oak forest of NE Spain*. *Forest Ecology and Management*, 180(1-3), 175-184.

Okada, Vinicius; Hernandez, Zulimar, Figueiredo, Tomás de (2023). *E.1.2. Cartografia com localização e delimitação das áreas piloto. Relatório de Execução de Atividades*. Projeto ForestWaterUp- Soluções baseadas na natureza para o restauro ecológico de solos degradados nos Lagos do Sabor, Mogadouro (documento interno COMPETE).

Oliveira, F. Í. F. D. (2016). *Influência do modo de irrigação na tolerância de plantas ornamentais à salinidade da água*.

Oliveira, J. V. M. M., Machado, G. C. X. M. P., & da Costa Vasconcelos, L. P. (2024). *A compostagem como solução baseada na natureza para lidar com os resíduos urbanos: estudo de caso da Composta 'e*. *Cadernos de Agroecologia*, 19(1).

Ouyang, Y., Xu, D., Leininger, T. D., & Zhang, N. (2016). *Um modelo dinâmico de sistemas para estimar processos hidrológicos e uso de água em uma plantação de eucalipto*. *Engenharia Ecológica*, 86, 290-299.

Özcan, M. M., & Haciseferoğulları, H. (2007). *The strawberry (Arbutus unedo L.) fruits: chemical composition, physical properties and mineral contents*. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 1022-1028.

- Pallauf, K., Rivas-Gonzalo, J. C., Del Castillo, M. D., Cano, M. P., & de Pascual-Teresa, S. (2008). *Caracterização da composição antioxidante de frutos de medronheiro (Arbutus unedo L.)*. *Jornal de Composição e Análise de Alimentos*, 21(4), 273-281.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). *Climate-smart soils*. *Nature*, 532(7597), 49-57.
- Pereira, R. A. G. (2014). *Efeito do pH e da fonte de Azoto na cultura in vitro de medronheiro (Arbutus unedo L.)* (Master's thesis).
- Pinzón-Torres, J. A., & Schiavinato, M. A. (2008). *Crescimento, eficiência fotossintética e eficiência do uso da água em quatro espécies de leguminosas arbóreas tropicais*. *Hoehnea*, 35, 395-404.
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). *Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control*. *New phytologist*, 193(1), 30-50.
- Portaria nº 185/2022 de 21 de julho. Aprova os tipos de matérias fertilizantes não harmonizadas, define o tipo de matérias-primas que podem ser utilizadas na sua produção e estabelece os respectivos requisitos de colocação no mercado. Diário da República n.º 140/2022, Série I de 2022-07-21, páginas 5 – 44. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/185-2022-186429710>
- Rincón, B., Bujalance, L., Feroso, F. G., Martín, A., & Borja, R. (2013). *Potencial bioquímico de metano de resíduos sólidos de lagar de azeitona bifásico: Influência do pré-tratamento térmico na cinética do processo*. *Tecnologia de Biorecursos*, 140, 249-255.
- Röll, A., Ramesha, M. N., Link, R. M., Hertel, D., Schuldt, B., Patil, S. L., & Hölscher, D. (2021). *Water availability controls the biomass increment of Melia dubia in South India*. *Forests*, 12(12), 1675.
- Romano, M. R. (2001). *Análise de crescimento, produção de biomassa, fotossíntese e biossíntese de aminoácidos em plantas transgênicas de tabaco (Nicotiana tabacum L.) que expressam o gene Lhcb1* 2 de ervilha*. Dissertação de Mestrado. São Paulo, USP. 66p).

- Rossi, F., Mugnai, G., & De Philippis, R. (2018). *Papel complexo da matriz polimérica em crostas biológicas do solo*. *Planta e Solo*, 429, 19-34.
- Royer, A. C., de Figueiredo, T., Fonseca, F., Lado, M., & Hernández, Z. (2023). *Short-term effects of olive-pomace-based conditioners on soil aggregation stability*. *Agronomy*, 14(1), 5.
- Ryan, M. G., & Law, B. E. (2005). *Interpreting, measuring, and modeling soil respiration*. *Biogeochemistry*, 73(1), 3-27.
- Santiso, X., & Retuerto, R. (2017). *Master of one trade: Arbutus unedo relies on plasticity to persist under habitats differing in water availability*. *Journal of Plant Ecology*, 10(5), 869-881.
- Schmidt, M. W., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., & Trumbore, S. E. (2011). *Persistência da matéria orgânica do solo como propriedade do ecossistema*. *Natureza*, 478(7367), 49-56.
- Segatelli, A. B. de M., Figueiredo, D., Hernández, Z., & de Figueiredo, T. (2023). *Efeito de diferentes agentes estruturantes e revolvimentos na compostagem do bagaço de azeitona*. *Revista de Ciências Agrárias*, 46(especial).
- Shipley, B., & Meziane, D. (2002). *The balanced-growth hypothesis and the allometry of leaf and root biomass allocation*. *Functional Ecology*, 16(3), 326-331.
- Silva, A. C. F., Silveira, L. P., Nunes, I. G., & Souto, J. S. (2012). *Superação de dormência de Enterolobium contortisiliquum Mor. (Vell.) Morong*. *Scientia Plena*, 8(4 (b)).
- Sosa, L. L., Martín-Palomo, M. J., Castro-Valdecantos, P., & Madejón, E. (2023). *Agricultural use of compost under different irrigation strategies in a hedgerow olive grove under Mediterranean conditions—a comparison with traditional systems*. *Soil*, 9(1), 325-338.
- Toloto, M., Lima, A., Royer, A., Segatelli, A. B., Gusmão, A., de Figueiredo, T., & Hernandez, Z. (2024). *Avaliação da aplicação de compostado no sequestro de carbono orgânico no solo e nas propriedades físico-químicas em agroecossistemas de olival no nordeste de Portugal*. *Revista de Ciências Agrárias*, 47(4), 509-514.

- Tong, C., Hill, C. B., Zhou, G., Zhang, X. Q., Jia, Y., & Li, C. (2021). *Opportunities for improving waterlogging tolerance in cereal crops—physiological traits and genetic mechanisms*. *Plants*, 10(8), 1560.
- Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J. C., & Peralta-Sánchez, M. G. (2022). *Organic substrates differentially affect growth and macronutrient concentrations of lulo (*Solanum quitoense* Lam.) seedlings*. *Horticulturae*, 8(12), 1200.
- UICN. (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges* (E. Cohen-Shacham, G. Walters, C. Janzen, & S. Maginnis (eds.)).
- UNEP. (2022). *Resolution Adopted by the United Nations Environment Assembly on 2 March 2022. 5/5. Nature-based solutions for supporting sustainable development*.
- Vallejo, V. R., Smanis, A., Chirino, E., Fuentes, D., Valdecantos, A. e Vilagrosa, A. (2012). *Perspectives in dryland restoration: Approaches for climate change adaptation*. *New Forests*, 43(5–6), 561–579.
- Van Nguyen, L., Le, L. T., Dinh, T. H., Nguyen, T. T., Vu, H. T. T., Chu, H. D., & Nguyen, V. L. (2024). *Germination responses to seed-rhizosphere hypoxia in relation to waterlogging tolerance of soybean*. *Vegetos*, 37(3), 1098-1106.
- Vasques, A., Chirino, E., Vilagrosa, A., Vallejo, V. R., & Keizer, J. J. (2013). *The role of seed provenance in the early development of *Arbutus unedo* seedlings under contrasting watering conditions*. *Environmental and experimental botany*, 96, 11-19.
- Vilhena, J. M. J. (2019). *Contributo Para o Estabelecimento de Reserva ex Situ de Medronheiro (*Arbutus Unedo* L.): Condições de Germinação, Instalação e Crescimento em Viveiro de Plantas de Diferentes Proveniências* (Master's thesis, Universidade de Lisboa (Portugal)).
- Zonta, E., Stafanato, J. B., & Pereira, M. G. (2021). *Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais*.
- Zulfikar, F., Casadesús, A., Brockman, H., & Munné-Bosch, S. (2020). *Uma visão geral dos bioestimulantes naturais à base de plantas para horticultura sustentável, com foco particular nos extratos de folhas de moringa*. *Ciência das Plantas*, 295, 110194.

ANEXOS

Anexo 1 - Informação cartográfica da área de estudo na zona de intervenção do projeto ForestWaterUp

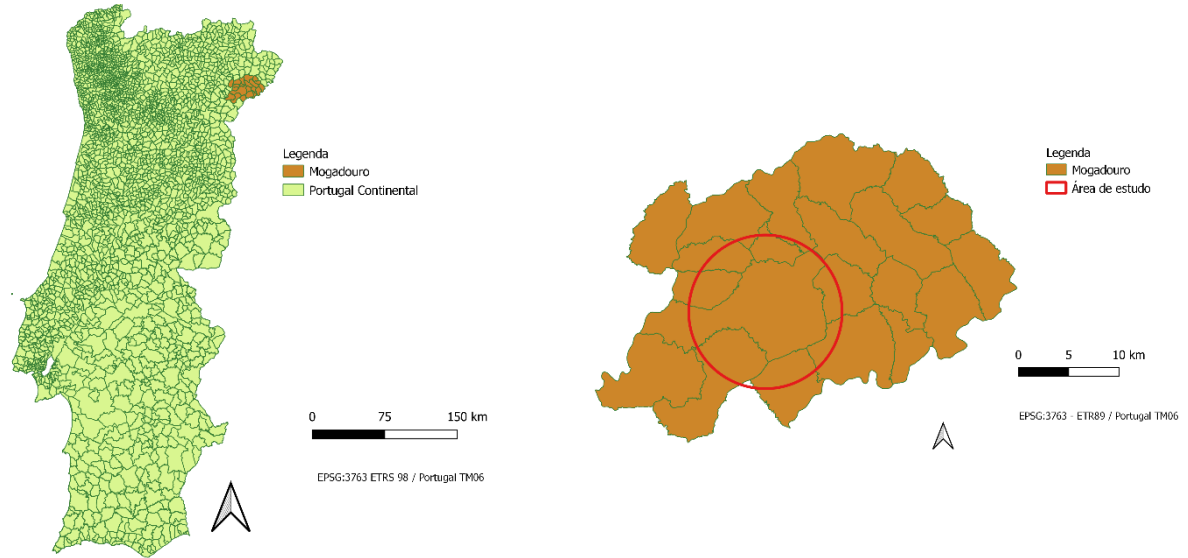


Figura 1A: Mapa de localização da área de estudo em Mogadouro, Bragança, Portugal.

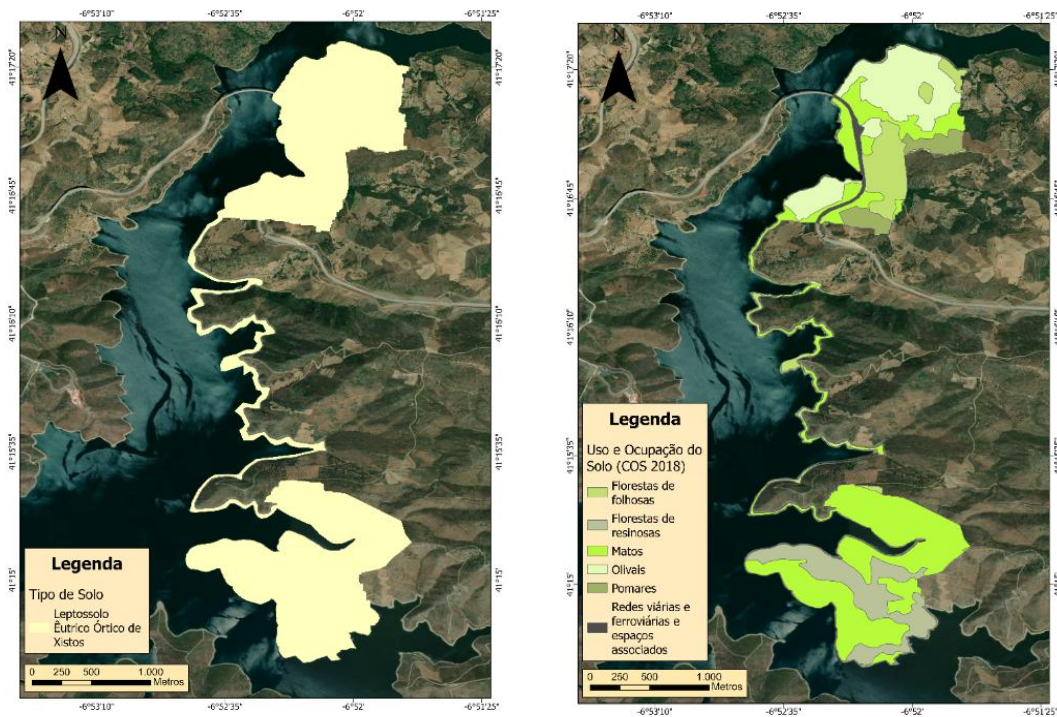



Figura 1B: Mapa de Tipo de Solo (esquerda) e COS-Uso e ocupação do solo (direita) da área de intervenção no projeto ForestWaterUP. Fonte: Okada et al., 2023.


Anexo 2 - Ficha de campo para a monitorização de plantas na área de intervenção


Propagação e plantação de árvores mediterrânicas nos Lagos do Sabor: Prepara-te para plant@
Visita de estudo aos Lagos do Sabor, Mogadouro


Identificação
 Grupo: _____
 Composto utilizado: _____
 Parcela: _____

N	Espécie	Nível de Vitalidade	Altura	Nº de folhas
16	<input type="checkbox"/> Azinheira	<input checked="" type="checkbox"/> Medronheiro	<input type="checkbox"/> 0-20 cm	<input type="checkbox"/> 0-20 folhas
	<input type="checkbox"/> Zimbro	<input type="checkbox"/> Freixo	<input type="checkbox"/> 20-40 cm	<input type="checkbox"/> 20-40 folhas
	<input type="checkbox"/> Sobreiro	<input type="checkbox"/> Salgueiro	<input type="checkbox"/> >40 cm	<input type="checkbox"/> >40 folhas
17	<input type="checkbox"/> Azinheira	<input type="checkbox"/> Medronheiro	<input type="checkbox"/> 0-20 cm	<input type="checkbox"/> 0-20 folhas
	<input type="checkbox"/> Zimbro	<input type="checkbox"/> Freixo	<input type="checkbox"/> 20-40 cm	<input type="checkbox"/> 20-40 folhas
	<input checked="" type="checkbox"/> Sobreiro	<input type="checkbox"/> Salgueiro	<input checked="" type="checkbox"/> >40 cm	<input type="checkbox"/> >40 folhas
18	<input type="checkbox"/> Azinheira	<input checked="" type="checkbox"/> Medronheiro	<input checked="" type="checkbox"/> 0-20 cm	<input type="checkbox"/> 0-20 folhas
	<input type="checkbox"/> Zimbro	<input type="checkbox"/> Freixo	<input type="checkbox"/> 20-40 cm	<input type="checkbox"/> 20-40 folhas
	<input type="checkbox"/> Sobreiro	<input type="checkbox"/> Salgueiro	<input type="checkbox"/> >40 cm	<input type="checkbox"/> >40 folhas
19	<input type="checkbox"/> Azinheira	<input checked="" type="checkbox"/> Medronheiro	<input checked="" type="checkbox"/> 0-20 cm	<input type="checkbox"/> 0-20 folhas
	<input type="checkbox"/> Zimbro	<input type="checkbox"/> Freixo	<input type="checkbox"/> 20-40 cm	<input type="checkbox"/> 20-40 folhas
	<input type="checkbox"/> Sobreiro	<input type="checkbox"/> Salgueiro	<input type="checkbox"/> >40 cm	<input type="checkbox"/> >40 folhas
20	<input type="checkbox"/> Azinheira	<input type="checkbox"/> Medronheiro	<input type="checkbox"/> 0-20 cm	<input type="checkbox"/> 0-20 folhas
	<input type="checkbox"/> Zimbro	<input type="checkbox"/> Freixo	<input type="checkbox"/> 20-40 cm	<input type="checkbox"/> 20-40 folhas
	<input checked="" type="checkbox"/> Sobreiro	<input type="checkbox"/> Salgueiro	<input checked="" type="checkbox"/> >40 cm	<input type="checkbox"/> >40 folhas
21	<input type="checkbox"/> Azinheira	<input checked="" type="checkbox"/> Medronheiro	<input checked="" type="checkbox"/> 0-20 cm	<input type="checkbox"/> 0-20 folhas
	<input type="checkbox"/> Zimbro	<input type="checkbox"/> Freixo	<input type="checkbox"/> 20-40 cm	<input type="checkbox"/> 20-40 folhas
	<input type="checkbox"/> Sobreiro	<input type="checkbox"/> Salgueiro	<input type="checkbox"/> >40 cm	<input type="checkbox"/> >40 folhas


Azinheira




Sobreiro




Zimbro




Medronheiro



Freixo



Salgueiro






Figura 2: Ficha de monitorização no campo Ecology day (2023).

Anexo 3 - Caracterização físico-química dos substratos utilizados no ensaio de estufa

Tabela 1: Análise físico-químico dos tipos de substratos, incluída a SbN-composto, usados como tratamentos no ensaio de estufa.

		T			SC			SS		
		Areia			Compost			Substrato comercial		
		Media	+/-	desv	Media	+/-	desv	Media	+/-	desv
Humidade	%	10,6	+/-	0,4	16,4	+/-	0,1	61,3	+/-	0,1
Densidade aparente	g/cm3	1,0	+/-	0,0	0,5	+/-	0,0	0,1	+/-	0,0
Densidade Real	g/cm3	2,5	+/-	0,1	1,4	+/-	0,1	0,4	+/-	0,0
Porosidade	%	57,9	+/-	0,1	63,7	+/-	3,7	74,7	+/-	2,8
Cinzas	%	97,3	+/-	0,08	39,2	+/-	1,77	14,7	+/-	0,37
C total	%	0,9	+/-	0,01	21,6	+/-	1,49	43,5	+/-	0,15
N total	%	0,0	+/-	0,01	1,5	+/-	0,01	1,0	+/-	0,01
C/N	-	26,3	+/-	3,62	14,3	+/-	0,90	42,6	+/-	0,31
O/C atomic ratio	-	1,3	+/-	0,1	1,3	+/-	0,0	0,6	+/-	0,0
H/C atomic ratio	-	1,7	+/-	0,1	1,5	+/-	0,0	1,5	+/-	0,0
pH	-	-	+/-	-	7,4	+/-	0,2	-	+/-	-
Condutividade	mS/cm	-	+/-	-	3,8	+/-	0,3	-	+/-	-
N-NO3	mg/Kg	285,0	+/-	-	288,0	+/-	1,0	288,0	+/-	5,7
P-PO4	mg/Kg	0,6	+/-	-	1,2	+/-	0,2	45,9	+/-	3,2
K2O	mg/Kg	10,1	+/-	-	10373		769,1	331,0	+/-	287,2
Ca	cmolKg	3,2	+/-	-	42,5	+/-	3,4	55,8	+/-	13,1
Mg	cmolKg	0,4	+/-	-	10,0	+/-	0,7	7,6	+/-	2,2
K	cmolKg	0,0	+/-	-	22,0	+/-	1,6	0,8	+/-	0,7
Na	cmolKg	0,1	+/-	-	1,4	+/-	0,1	9,5	+/-	4,8
SB	cmolKg	3,7	+/-	-	76,0	+/-	5,8	73,7	+/-	9,8
B	mg/kg	0,1	+/-	-	4,1	+/-	0,1	0,5	+/-	0,1
Fe	mg/kg	7,2	+/-	-	273,2	+/-	9,5	203,3	+/-	71,3
Mn	mg/kg	5,6	+/-	-	101,2	+/-	3,6	36,4	+/-	11,9
Cu	mg/kg	0,8	+/-	-	2,1	+/-	0,1	3,4	+/-	0,6
Zn	mg/kg	2,8	+/-	-	35,5	+/-	1,6	13,7	+/-	1,0

Fonte: Hernández et al., 2024 (com. per).

Anexo 4 - Localização e disposição das parcelas de amostragem de campo em Lagos do Sabor

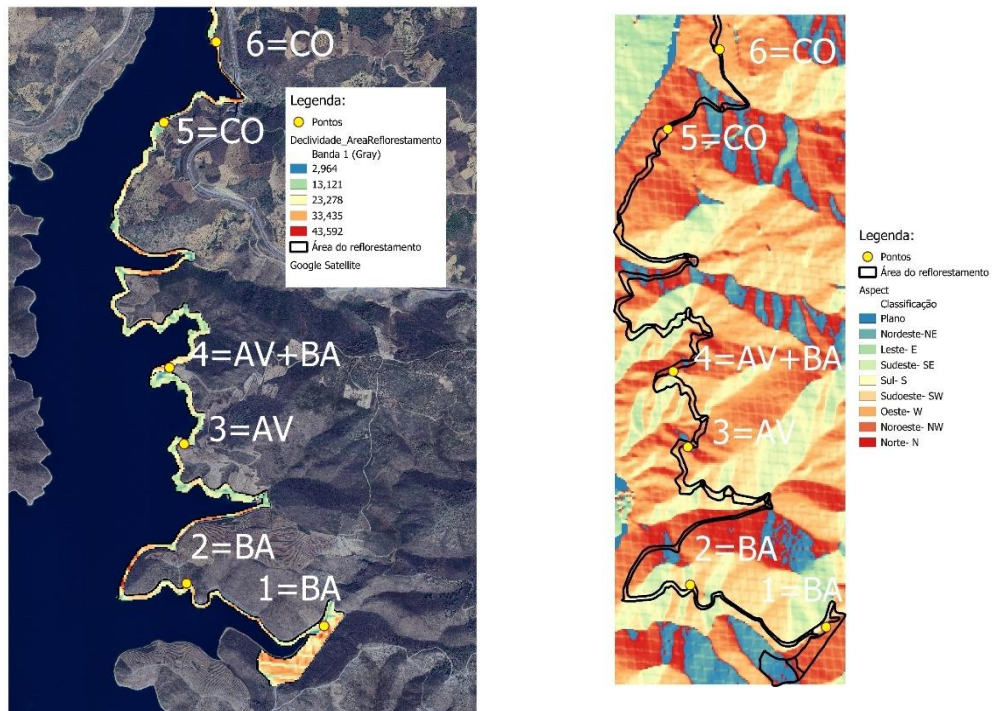


Figura 3: Mapa de localização das parcelas (esquerda) de amostragem de campo em Lagos do Sabor e as orientações das parcelas (direita).

Anexo 5 - Análise estatística por ANOVA de fator único realizada no software Microsoft Excel

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
MT	5	61,11111	12,22222	70,04458
MC	5	93,51852	18,7037	170,3532
MS	5	162,037	32,40741	22,71948

Figura 4 – Estatísticas descritivas das variáveis por grupo de tratamento (MT, MC e MS), para 20 dias depois da sementeira.

ANOVA						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1062,071	2	531,0357	6,054741	0,015204	3,885294
Dentro de grupos	1052,469	12	87,70576			
Total	2114,54	14				

Figura 5 – Análise de variância (ANOVA) entre os grupos de tratamento (MT, MC e MS), para 20 dias depois da sementeira.

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
MT	5	133,3333	26,66667	119,7702
MC	5	201,8519	40,37037	21,262
MS	5	186,1111	37,22222	28,03498

Figura 6 – Estatísticas descritivas das variáveis por grupo de tratamento (MT, MC e MS), para 28 dias depois da sementeira.

ANOVA						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	515,2035	2	257,6017	4,570994	0,033436	3,885294
Dentro de grupos	676,2689	12	56,35574			
Total	1191,472	14				

Figura 7 – Análise de variância (ANOVA) entre os grupos de tratamento (MT, MC e MS), para 28 dias depois da sementeira.

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
MT	5	164,8148	32,96296	40,9808
MC	5	217,5926	43,51852	9,859396
MS	5	185,1852	37,03704	24,43416

Figura 8 – Estatísticas descritivas das variáveis por grupo de tratamento (MT, MC e MS), para 40 dias depois da sementeira.

ANOVA						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	283,3791	2	141,6895	5,646925	0,018691	3,885294
Dentro de grupos	301,0974	12	25,09145			
Total	584,4765	14				

Figura 9 – Análise de variância (ANOVA) entre os grupos de tratamento (MT, MC e MS), para 40 dias depois da sementeira.

SUMÁRIO				
<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
MT	5	161,1111	32,22222	46,89643
MC	5	220,3704	44,07407	9,687929
MS	5	185,1852	37,03704	24,43416

Figura 10 – Estatísticas descritivas das variáveis por grupo de tratamento (MT, MC e MS), para 48 dias depois da sementeira.

ANOVA						
<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	355,2812	2	177,6406	6,577778	0,011784	3,885294
Dentro de grupos	324,0741	12	27,00617			
Total	679,3553	14				

Figura 11 – Análise de variância (ANOVA) entre os grupos de tratamento (MT, MC e MS), para 48 dias depois da sementeira.

Anexo 6 - Análise estatística por ANOVA de fator único realizada no Box-and-Whisker Plot

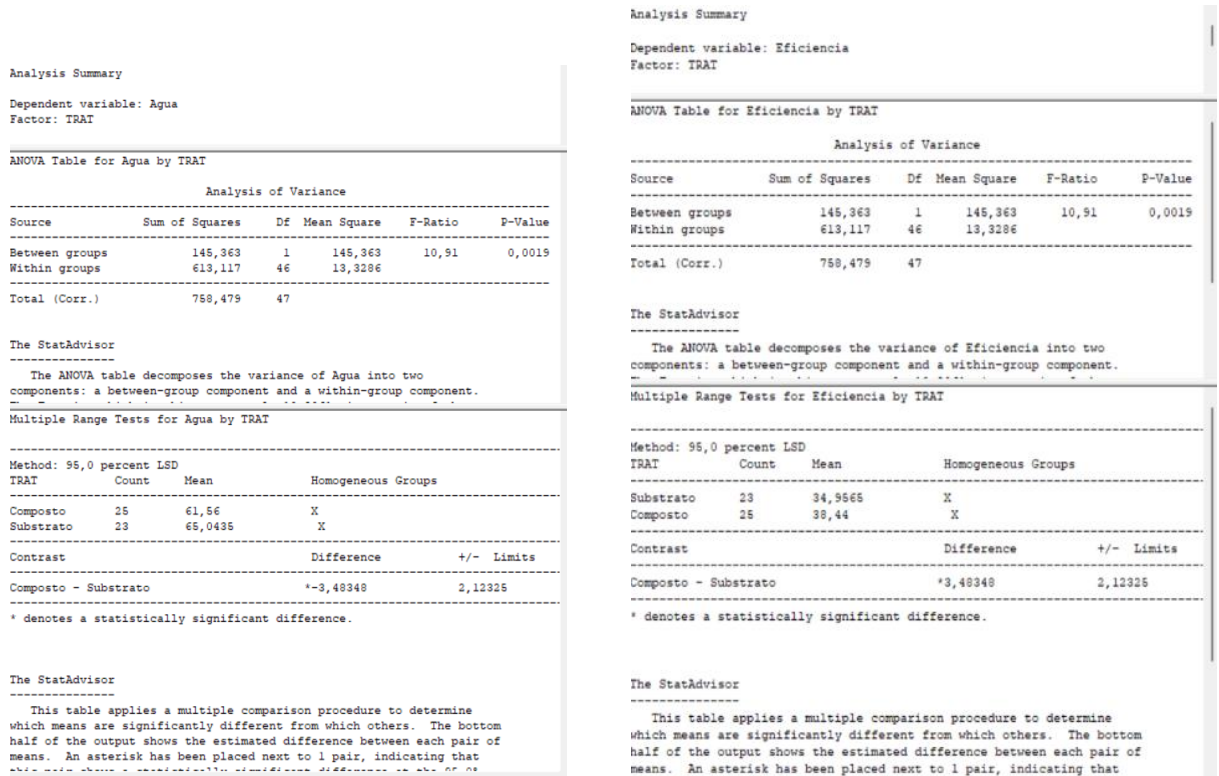


Figura 12: Análise de variância (ANOVA) para as variáveis a) Conteúdo de água e b) Eficiência no uso de água nos tratamentos MC e MS realizada no software Box-and-Whisker Plot.

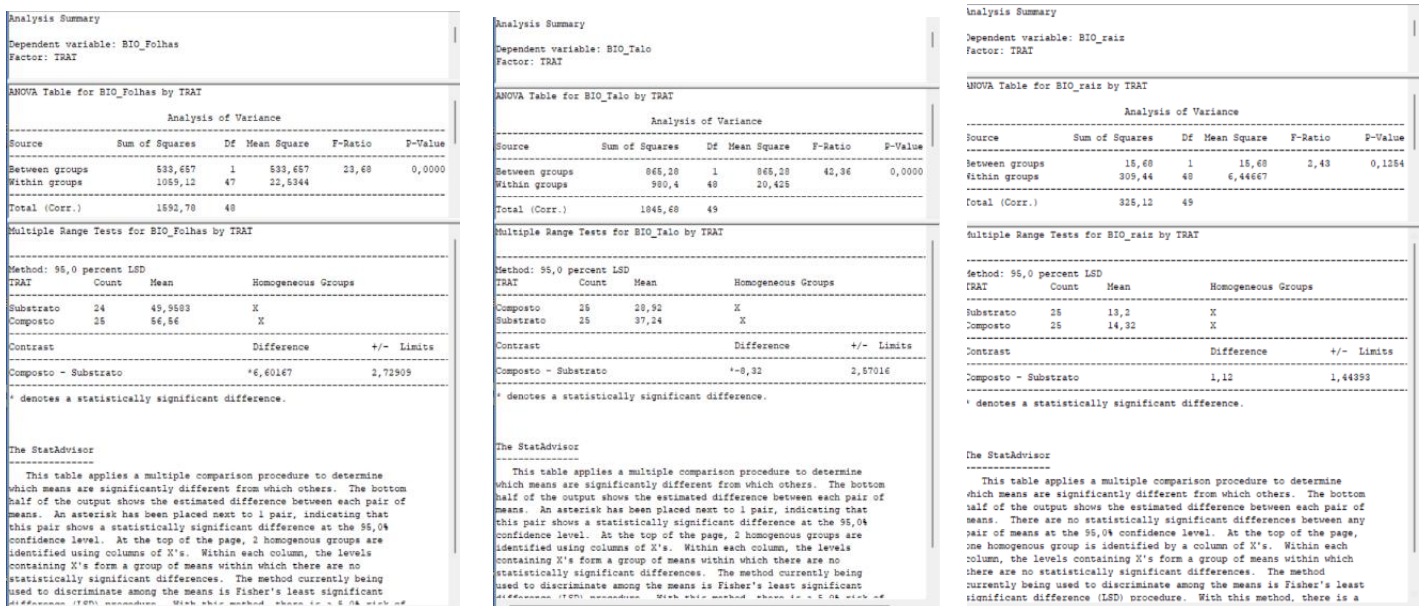


Figura 13: Análise de variância (ANOVA) para as variáveis de biomassa a) Folhas b) Talo e c) raiz nos tratamentos MC e MS realizada no software Box-and-Whisker Plot.

```

Analysis Summary
Dependent variable: BAS
Factor: TRAT

ANOVA Table for BAS by TRAT

Analysis of Variance
Source          Sum of Squares  Df  Mean Square  F-Ratio  P-Value
-----
Between groups  533,657         1   533,657     23,68    0,0000
Within groups   1059,12         47  22,5344
-----
Total (Corr.)   1592,78         48

Multiple Range Tests for BAS by TRAT

Method: 95,0 percent LSD
TRAT      Count  Mean      Homogeneous Groups
-----
Substrato  24    49,9583   X
Composto  25    56,56     X

Contrast          Difference      +/-  Limits
-----
Composto - Substrato  *6,60167      2,72909

* denotes a statistically significant difference.

The StatAdvisor
-----
This table applies a multiple comparison procedure to determine
which means are significantly different from which others. The bottom
half of the output shows the estimated difference between each pair of
means. An asterisk has been placed next to 1 pair, indicating that
this pair shows a statistically significant difference at the 95,0%
confidence level. At the top of the page, 2 homogenous groups are
identified using columns of X's. Within each column, the levels
containing X's form a group of means within which there are no
statistically significant differences. The method currently being
used to discriminate among the means is Fisher's least significant

```

```

Analysis Summary
Dependent variable: BNA
Factor: TRAT

ANOVA Table for BNA by TRAT

Analysis of Variance
Source          Sum of Squares  Df  Mean Square  F-Ratio  P-Value
-----
Between groups  533,657         1   533,657     23,68    0,0000
Within groups   1059,12         47  22,5344
-----
Total (Corr.)   1592,78         48

The StatAdvisor
-----
The ANOVA table decomposes the variance of BNA into two components:
a between-group component and a within-group component. The F-ratio,

Multiple Range Tests for BNA by TRAT

Method: 95,0 percent LSD
TRAT      Count  Mean      Homogeneous Groups
-----
Composto  25    43,44     X
Substrato  24    50,0417   X

Contrast          Difference      +/-  Limits
-----
Composto - Substrato  *-6,60167      2,72909

* denotes a statistically significant difference.

The StatAdvisor
-----
This table applies a multiple comparison procedure to determine
which means are significantly different from which others. The bottom
half of the output shows the estimated difference between each pair of
means. An asterisk has been placed next to 1 pair, indicating that
this pair shows a statistically significant difference at the 95,0%

```

Figura 14: Análise de variância (ANOVA) para as variáveis de biomassa a) Assimilatória e b) Não assimilatória nos tratamentos MC e MS realizada no software Box-and-Whisker Plot.

Anexo 7 – Resultados da modelação do crescimento do Medronheiro (*Arbutus unedo* L.) nos tratamentos MC e MS



Figura 15: Quantificação do modelo para altura do Medronheiro do tratamento MC.

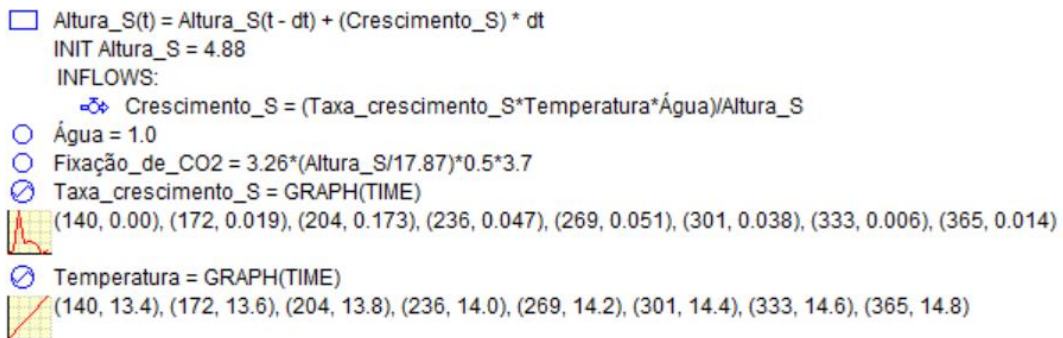


Figura 16: Quantificação do modelo para altura do Medronheiro do tratamento MS.

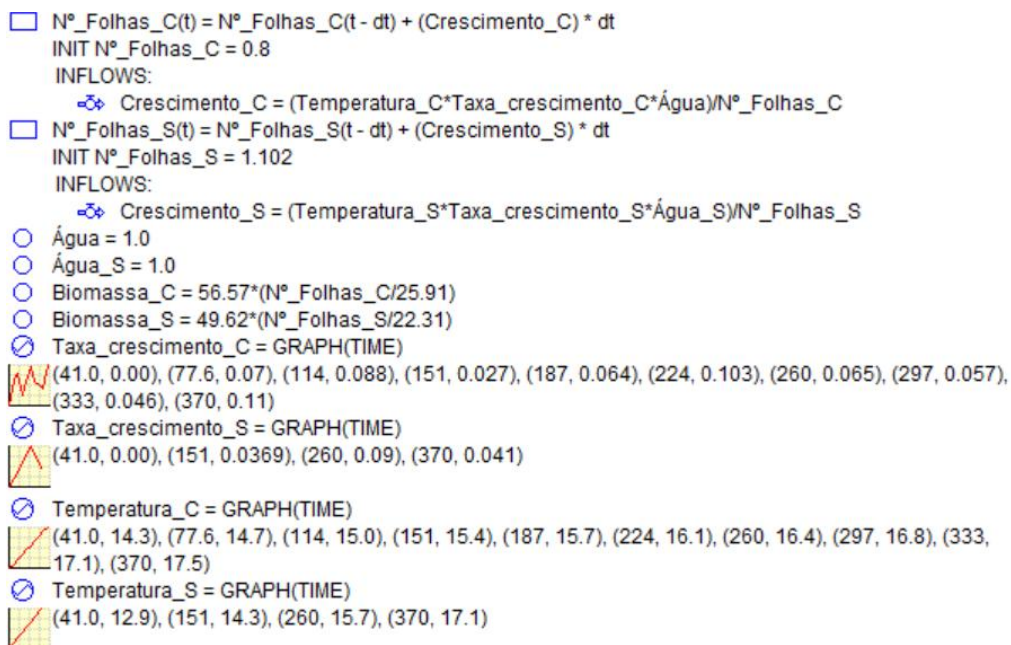


Figura 17: Quantificação do modelo para número de folhas do Medronheiro do tratamento MC e MS.

Tabela 2: Média das alturas dos tratamentos MC e MS num intervalo de tempo de 140-365 dias.

Dias	140	146	161	180	189	196	203	211	217	225	231	238	258	279	300	335	365
Meses	06/jun	12/jun	27/jun	16/jul	25/jul	01/ago	08/ago	16/ago	22/ago	30/ago	05/set	12/set	02/out	23/out	13/nov	18/dez	15/jan
MC	2,01	2,75	2,75	2,88	4,49	5,09	6,13	6,99	7,93	7,93	8,57	9,97	11,01	12,21	14,33	15,09	15,97
MS	4,88	5,91	5,91	6,27	8,01	8,79	10,00	11,09	12,35	12,35	13,27	14,42	15,37	16,44	17,23	17,45	17,87

Tabela 3: Média de número de folhas dos tratamentos MC e MS num intervalo de tempo de 41-370 dias.

Dias	41	49	56	63	69	76	83	92	111	126	132	140	187	277	370
Meses	28/fev	07/mar	14/mar	21/mar	27/mar	03/abr	10/abr	19/abr	08/mai	23/mai	29/mai	06/jun	23/jul	21/out	22/jan
MC	0,80	1,36	1,98	2,17	3,70	4,15	4,87	5,45	6,53	7,22	8,07	8,07	15,73	15,66	25,91
MS	1,10	1,40	2,54	1,94	4,34	5,31	6,14	6,87	8,58	9,94	11,24	11,24	18,49	18,52	22,31