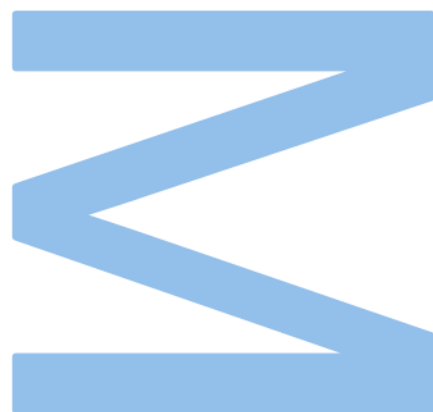


# Efeitos da gestão do coberto vegetal nos parâmetros físico- químicos e biológicos do solo em vinha



Ana M. R. da Silva Ferraz

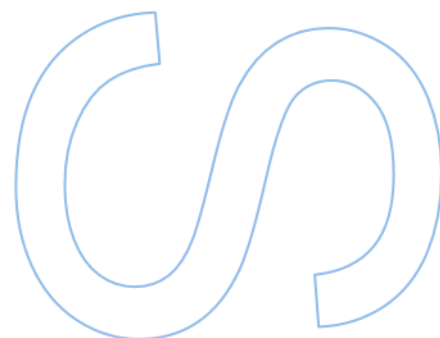
Mestrado em Avaliação e Remediação de Solos

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Faculdade de

Engenharia da Universidade do Porto

2025



# Ana M. R. da Silva Ferraz

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Avaliação e  
Remediação de Solos

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território  
2025

## **Orientador**

Anabela Ferreira De Oliveira Cachada, Investigadora Auxiliar,  
GreenUPorto & Departamento de Geociências, Ambiente e  
Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da  
Universidade do Porto

## **Coorientador**

Ruth Maria de Oliveira Pereira, Professora Associada com  
Agregação, GreenUPorto & Departamento de Biologia, Faculdade  
de Ciências da Universidade do Porto



*Ao meu melhor amigo*

## Agradecimentos

Não posso deixar de agradecer a todos aqueles que fizeram parte deste percurso e tornaram não só este capítulo da minha vida possível, como também a sua finalização. Sem o apoio que recebi nunca o teria conseguido.

Gostaria de agradecer à minha família: aos meus padrinhos, à minha avó, à minha irmã e ao irmão emprestado que me deu, aos meus amigos: em especial à Cheila e à Carolina, pelo apoio incondicional e um ombro amigo, mas a cima de tudo e todos aos meus pais, que para além de terem tornado os meus estudos possíveis, apoiaram-me sempre com muito amor, paciência e compreensão. Nos maus e bons momentos sempre foram os meus melhores amigos.

Gostaria de expressar o meu profundo agradecimento, também, à Comissão de Viticultura da Região dos Vinhos Verdes, em particular à Eng.<sup>a</sup> Tânia Rodrigues e ao Dr. Alexander Conejo, por proporcionarem na EVAG um local de estudo e pelo interesse manifestado no desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, Doutora Anabela Cachada, manifesto a minha sincera gratidão pela orientação atenta, pela constante disponibilidade e paciência, e por todo o apoio prestado ao longo deste percurso.

À minha coorientadora, Doutora Ruth Pereira, agradeço pelo valioso contributo dos seus conhecimentos, que enriqueceram significativamente este trabalho. Agradeço ainda por terem tido em consideração os meus interesses académicos e pessoais, propondo-me um tema que foi ao encontro dos mesmos.

A todos os colegas e amigos com quem trabalhei durante a execução desta dissertação, em especial à Rute Duarte, à Catarina Ganilho e à Vanessa Almeida.

Dedico também, por fim, este trabalho ao meu melhor amigo que me deixou muito cedo, no início deste ano. Penso sempre em ti.

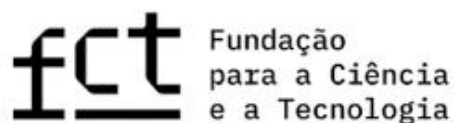
**Gostaria, ainda, de agradecer o apoio financeiro do:**

Projeto STrengthS4WineChain - Sinergias científicas e tecnológicas para o desenvolvimento da cadeia da vinha e do vinho na Região Norte (REF) - NORTE2030-FEDER-01786100, cofinanciado pelo Programa Regional Norte 2030 e pela União Europeia.



**Cofinanciado pela  
União Europeia**

E também ao financiamento programático do GreenUPorto - Centro de Investigação em Produção Agroalimentar Sustentável (UID/05748/2025), financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, Portugal, sem o qual este trabalho não teria sido possível.



## Resumo

As culturas de cobertura têm ganho um crescente destaque como prática de gestão sustentável do solo, sobretudo em vinhas mediterrânicas, pela sua capacidade de reduzir a erosão, melhorar a fertilidade e promover a biodiversidade dos solos. Este trabalho, financiado pelo projeto STrengthS4WineChaiN - Sinergias científicas e tecnológicas para o desenvolvimento da cadeia da vinha e do vinho na Região Norte (REF) - NORTE2030-FEDER-01786100, avaliou o impacto de diferentes modos de gestão de coberturas vegetais (mobilização, não mobilização e sementeira de diferentes misturas anuais e de longa duração) nos parâmetros físico-químicos (humidade, densidade aparente, capacidade máxima de retenção de água, pH, condutividade, percentagem de matéria orgânica, nutrientes (fósforo e carbono orgânico) e elementos potencialmente tóxicos (EPTs) presentes no solo), e atividade e diversidade funcional microbiana do solo (ensaio de BIOLOG<sup>TM</sup> e respiração basal do solo). A estabilidade das diferentes espécies da mistura e o seu contributo para a diversidade florística foi também avaliada através de um levantamento florístico efetuado na Primavera de forma a averiguar a viabilidade das espécies, numa vinha do norte de Portugal, nomeadamente na Região dos Vinhos Verdes em Arcos de Valdevez. A análise demonstrou que, de uma forma geral, a ausência de mobilização favoreceu um maior equilíbrio ecológico, e a utilização de misturas destacou-se por promover um maior equilíbrio entre cobertura, riqueza florística e atividade microbiana, com algumas misturas a destacarem-se (M5 e M6), ambas misturas anuais. Contudo, os resultados não foram suficientemente conclusivos, para se indicar qual a melhor opção em termos de saúde do solo. Foi, no entanto, claro que a adequação das misturas aos diferentes tipos de solos e suas condições e regiões climáticas, deve ser alvo de ensaios preliminares e de uma avaliação criteriosa.

Palavras-chave: vegetação espontânea, sementeira, mobilização do solo, biodiversidade florística, biodiversidade funcional, atividade microbiana

## Abstract

Cover crops have gained increasing prominence as a sustainable soil management practice, particularly in Mediterranean vineyards, due to their ability to reduce erosion, improve fertility, and promote soil biodiversity. This study, financed by the project STrengthS4WineChaiN - Sinergias científicas e tecnológicas para o desenvolvimento da cadeia da vinha e do vinho na Região Norte (REF) - NORTE2030-FEDER-01786100, evaluated the impact of different cover crop management methods (tillage, no-tillage, and sowing of various annual and long-term mixtures) on soil physico-chemical parameters (moisture, bulk density, maximum water retention capacity, pH, conductivity, organic matter content, nutrients (phosphorus and organic carbon) and potentially toxic elements (PTEs)), as well as soil microbial activity and functional diversity (BIOLOG™ assay and basal soil respiration). The stability of the different species within the mixtures and their contribution to floristic diversity was also assessed through a floristic survey conducted in spring, in order to determine species viability, in a vineyard located in northern Portugal, specifically in the Vinho Verde region in Arcos de Valdevez. Overall, the analysis showed that the absence of tillage generally promoted a greater ecological balance, and the use of mixtures stood out for enhancing the balance between cover, floristic richness, and microbial activity, with some mixtures being particularly noteworthy (M5 and M6), both annual mixtures. However, the results were not conclusive enough to indicate the best option in terms of soil health. Nonetheless, it became clear that the suitability of mixtures to different soil types, their conditions, and climatic regions should be subject to preliminary trials and thorough evaluation.

**Keywords:** spontaneous vegetation, seedbed, soil tillage, floristic biodiversity, functional biodiversity, microbial activity

# Índice

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Índice .....                                                                                          | 5  |
| Lista de Tabelas .....                                                                                | 7  |
| Lista de Figuras .....                                                                                | 8  |
| 1. Introdução .....                                                                                   | 11 |
| 1.1. As dificuldades do setor na gestão do recurso solo: a transição para práticas sustentáveis ..... | 12 |
| 1.2. Culturas de cobertura: características, gestão e benefícios .....                                | 17 |
| 2. Enquadramento .....                                                                                | 23 |
| 2.1. Caracterização da Região Demarcada dos Vinhos Verdes .....                                       | 23 |
| 2.2. Caracterização do Local de Estudo .....                                                          | 25 |
| 2.3. Principais doenças associadas à vinha na região dos Vinhos Verdes .....                          | 28 |
| 3. Materiais e Métodos .....                                                                          | 32 |
| 3.1. Recolha de amostras de solo para determinação de indicadores físico-químicos e biológicos .....  | 34 |
| 3.2. Pré-tratamento das amostras .....                                                                | 36 |
| 3.3. Determinação de indicadores físico-químicos .....                                                | 36 |
| 3.3.1. Determinação do pH do solo .....                                                               | 36 |
| 3.3.2. Determinação da condutividade elétrica do solo .....                                           | 36 |
| 3.3.3. Determinação do teor de matéria orgânica (MO) do solo por perda por ignição .....              | 37 |
| 3.3.4. Fósforo disponível .....                                                                       | 37 |
| 3.3.5. Carbono Orgânico Total (COT) .....                                                             | 38 |
| 3.3.8. Densidade Aparente (Da) do Solo .....                                                          | 39 |
| 3.3.9. Capacidade máxima de retenção de água (CRAMax) no solo .....                                   | 40 |
| 3.4. Indicadores biológicos de saúde do solo .....                                                    | 40 |
| 3.5. Testes estatísticos .....                                                                        | 43 |
| 4. Resultados e Discussão .....                                                                       | 43 |

|        |                                                                                                        |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.   | Impacto dos diferentes modos de gestão do coberto vegetal nos parâmetros físico-químicos do solo ..... | 43 |
| 4.2.   | Indicadores biológicos .....                                                                           | 57 |
| 4.2.1. | Respiração basal do solo .....                                                                         | 57 |
| 4.2.2. | Biodiversidade funcional da comunidade microbiana (ensaio de BIOLOG™)<br>62                            |    |
| 4.3.   | Levantamento florístico .....                                                                          | 68 |
|        | Conclusão .....                                                                                        | 76 |
|        | Referências Bibliográficas .....                                                                       | 78 |
|        | Anexos .....                                                                                           | 89 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Espécies presentes em cada uma das misturas testadas, que correspondem aos tratamentos do desenho experimental estabelecido pelos técnicos da EVAG em colaboração com a Fertiprado. ....                                                                                                                               | 33 |
| Tabela 2 - Concentrações pseudo-totais médias (mg/kg) de elementos potencialmente tóxicos, detetadas nos solos das entrelinhas sujeitos a cada um dos tratamentos em estudo, e os respetivos valores de referência para solos pouco profundos e uso agrícola, estabelecidos pela APA (Agência Portuguesa do Ambiente, 2022). .... | 56 |
| Tabela 3 – Valores médios de respiração basal do solo em mg O <sub>2</sub> /kg de solo seco, no último dia de ensaio, e a sua correspondente conversão para taxa de consumo de oxigénio (TCO) em mmol O <sub>2</sub> /kg de solo /h, para cada tratamento. ....                                                                   | 58 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Região demarcada dos vinhos verdes e as suas nove sub-regiões, (Vine to Wine Circle, 2025) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 25 |
| Figura 2 - Carta de ocupação do Solo de Arcos de Valdevez, ICNF (2014) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 27 |
| Figura 3 - Mapa de Portugal com a localização, e delimitação a vermelho, da Estação Vitivinícola Amândio Galhano (EVAG), em Arcos de Valdevez (Google Maps, 2025)..                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 32 |
| Figura 4 - Esquema representativo da distribuição dos tratamentos nas entrelinhas na parcela em estudo, com M1 (FERTICOVER I LEG AC), M2 (FERTICOVER II LEG AC), M3 (FERTICOVER I LEGRA VERDE), M4 (PROTERRA MAX AC), M5 (PROTERRA TERRA AC), M6 (PROTERRA STRUCTURATOR AC), NM (solo não mobilizado), MO (solo mobilizado bianualmente). .....                                                                                                                                                     | 34 |
| Figura 5 - O quadrado vermelho delimita a parcela experimental onde foram implementadas as culturas de cobertura, a amarelo estão delimitadas as entrelinhas da vinha, os círculos azuis correspondem à localização aproximada dos pontos de recolha de amostras. ....                                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| Figura 6 - Valores médios de pH em H <sub>2</sub> O (a) e KCl (b) e respetivos desvios padrão para cada tratamento, nas duas campanhas de amostragem. As diferenças significativas entre tratamentos, para a mesma campanha de amostragem, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras diferentes acima das barras. As diferenças significativas entre campanhas de amostragem, para cada tratamento, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com * acima das barras. ....     | 45 |
| Figura 7 - Valores médios de condutividade em $\mu\text{S}/\text{cm}$ e respetivos desvios padrão para cada tratamento, nas duas campanhas de amostragem. As diferenças significativas entre tratamentos, para a mesma campanha de amostragem, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras diferentes acima das barras. As diferenças significativas entre campanhas de amostragem, para cada tratamento, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com * acima das barras. .... | 46 |
| Figura 8 - Valores médios da matéria orgânica em percentagem e respetivos desvios padrão para cada tratamento. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 46 |
| Figura 9 - Valores médios de carbono orgânico em percentagem e respetivos desvios padrão para cada tratamento, nas duas campanhas de amostragem. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ). As diferenças                                                                                                                                                                                                                                                     |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| significativas entre campanhas de amostragem, para cada tratamento, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com * acima das barras. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 47 |
| Figura 10 - Valores médios de fósforo em mg P/Kg e respetivos desvios padrão para cada tratamento, nas duas campanhas de amostragem. As diferenças significativas entre tratamentos, para a mesma campanha de amostragem, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras diferentes acima das barras. As diferenças significativas entre campanhas de amostragem, para cada tratamento, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com * acima das barras. ....                                                      | 47 |
| Figura 11 - Valores médios de capacidade máxima de retenção de água do solo em percentagem e respetivos desvios padrão, para cada tratamento. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 54 |
| Figura 12 - Valores médios de densidade aparente do solo em $\text{g/cm}^3$ e respetivos desvios padrão, para cada tratamento. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 55 |
| Figura 13 – Taxa de consumo de oxigénio (TCO) em $\text{mmol O}_2/\text{kg}$ de solo /h e respetivos desvios padrão, para cada tratamento. As diferenças significativas entre tratamentos, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras diferentes acima das barras. ....                                                                                                                                                                                                                                              | 59 |
| Figura 14 - Taxa de consumo de oxigénio por kg de solo seco, ao longo de 6 dias, para cada tratamento. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 61 |
| Figura 15 - Desenvolvimento médio de cor nos poços (AWCD) e respetivos desvios padrão, para cada forma de gestão do solo (diferentes misturas de espécies de cobertura (M1-M6) versus mobilização (MO) e não mobilização do solo com vegetação espontânea (NM)), após 96h de incubação do solo exposto a 31 substratos orgânicos diferentes num ensaio de BIOLOG <sup>TM</sup> . Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....                                                              | 62 |
| Figura 16 - Índices de diversidade ( $H'$ ), uniformidade (E) e riqueza (R), médios relativos ao consumo de substratos e respetivos desvios padrão, para cada forma de gestão do solo (diferentes misturas de espécies de cobertura (M1-M6) versus mobilização (MO) e não mobilização do solo com vegetação espontânea (NM)), após 96h de incubação do solo exposto a 31 substratos orgânicos diferentes num ensaio de BIOLOG <sup>TM</sup> . Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ). .... | 64 |
| Figura 17 - Desenvolvimento médio de cor nos poços (AWCD), em cada fonte de carbono utilizada no ensaio, e respetivos desvios padrão, para cada forma de gestão do solo (diferentes misturas de espécies de cobertura (M1-M6) versus mobilização (MO) e não mobilização do solo com vegetação espontânea (NM)), ao longo de 96h de                                                                                                                                                                                                  |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| incubação do solo exposto a 31 substratos orgânicos diferentes num ensaio de BIOLOG™.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 66 |
| Figura 18 - Desenvolvimento médio de cor nos poços (AWCD), em cada fonte de carbono utilizada no ensaio, e respetivos desvios padrão, para cada forma de gestão do solo (diferentes misturas de espécies de cobertura (M1-M6) versus mobilização (MO) e não mobilização do solo com vegetação espontânea (NM)), após 96h de incubação do solo exposto a 31 substratos orgânicos diferentes num ensaio de BIOLOG™. As diferenças significativas entre tratamentos, considerando $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras acima das barras. .... | 67 |
| Figura 19 - Índices de diversidade, dominância e riqueza, médios, para cada tratamento. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 69 |
| Figura 20 - Percentagens relativas de cobertura de cada espécie identificada nos tratamentos de cobertura do solo com diferentes misturas (M1 a M6) e de espécies espontâneas no solo não mobilizado (NM) e mobilizado (MO). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 70 |

# 1. Introdução

Em 2023, a produção mundial de vinho foi estimada em 237 milhões de hectolitros, o valor mais baixo desde 1961 e 9,6% inferior ao de 2022, devido sobretudo a condições climáticas extremas e a doenças fúngicas que afetaram várias regiões vitivinícolas (OIV - International Organisation of Vine and Wine, 2023). Adicionalmente, a área global de vinha reduziu ligeiramente para 7,2 milhões de hectares, marcando o terceiro ano consecutivo de decréscimo, associado à remoção de vinhas em resposta a pressões como as alterações climáticas, económicas e políticas e ambientais, o que tem incentivado a procura por culturas alternativas.

O consumo mundial de vinho caiu também para 221 milhões de hectolitros, o nível mais baixo desde 1996, refletindo o aumento dos custos de produção e distribuição, enquanto as exportações globais diminuíram em volume (99 milhões de hectolitros), mas alcançaram um valor recorde de 36 mil milhões de euros devido à subida do preço médio por litro (3,62 euros) (OIV - International Organisation of Vine and Wine, 2022, 2023). Apesar destas quebras, o setor mantém elevada relevância económica e cultural, especialmente em países do Mediterrâneo como a Itália, França e Espanha, responsáveis por 51% da produção mundial, onde a viticultura constitui um pilar estratégico do desenvolvimento rural, do turismo e das exportações.

Portugal apresenta, também, uma significativa diversidade vitivinícola, organizada em Denominações de Origem Protegida (DOP) e Indicações Geográficas Protegidas (IGP), que se distribuem de norte a sul do território continental e nas regiões autónomas. Entre as principais regiões encontram-se o Vinho Verde, subdividido em sub-regiões como Monção e Melgaço, Amarante e Marco de Canavezes, Baião e Resende, e Porto, a região do Douro composta pelas sub-regiões Baixo Corgo, Cima Corgo e Douro Superior; a região do Dão; Bairrada; Beira Interior; Lisboa; Tejo; Península de Setúbal; a região do Alentejo, que inclui Portalegre, Borba, Vidigueira e outras sub-regiões; a região do Algarve; a região da Madeira, e por último a dos Açores (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2024, 2025a). Entre estas, destacam-se as regiões do Vinho Verde e a do Douro Vinhateiro, a primeira por ser a maior região vitivinícola nacional e a segunda por ser reconhecida como a mais antiga região demarcada do mundo (1756), classificado pela UNESCO como Património Mundial da Humanidade, em virtude do seu valor histórico, cultural e paisagístico (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2024).

A área total de vinha em Portugal, em 2009, era de aproximadamente 243.000 hectares, conforme dados disponíveis do Instituto da Vinha e do Vinho (IVV). Este valor colocava Portugal em 8.º lugar no ranking mundial de países com maior área de vinha, representando cerca de 3,2% da área mundial (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2009). O setor vitivinícola português desempenha, portanto, um papel estratégico na economia nacional, sobretudo nas zonas rurais, através da geração de valor económico associado à produção, certificação e exportação de vinhos. No que respeita ao comércio internacional, os dados mais recentes disponíveis mostram que, no primeiro semestre de 2025, Portugal exportou 110 milhões de litros de vinho, totalizando 294,5 milhões de euros em valor, o que corresponde a um preço médio de 2,92 euros por litro (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2025c). Até abril do mesmo ano, os dados específicos do primeiro trimestre indicam 80,5 milhões de litros exportados, no valor de 218 milhões de euros, a um preço médio de 2,71 euros por litro (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2025b). No ano de 2024, entre janeiro e novembro, Portugal exportou 329 milhões de litros de vinho, no valor de 899 milhões de euros, com um preço médio de 2,73 €/litro. Estes resultados traduzem um crescimento em volume (+10,1%) e em valor (+4,3%), apesar da descida do preço médio (-5,2%), reforçando a importância das exportações no setor vitivinícola nacional (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2025d).

Para além da sua dimensão produtiva, o setor assume crescente relevância no domínio do enoturismo, entendido como uma vertente turística que integra experiências relacionadas com a cultura do vinho potenciando o desenvolvimento local e a diversificação da oferta turística nacional (Santos, 2021). Estudos empíricos, como os realizados no Algarve, evidenciam que o enoturismo contribui não apenas para a economia regional, mas também para objetivos mais amplos de sustentabilidade social, cultural e ambiental (Costa et al., 2023). De igual modo, no Norte do país, as Rotas do Vinho do Porto e dos Vinhos Verdes consolidam-se como instrumentos de valorização económica e cultural, promovendo produtos certificados e atraindo visitantes interessados em património e tradições locais.

### **1.1. As dificuldades do setor na gestão do recurso solo: a transição para práticas sustentáveis**

A intensificação agrícola e as práticas de gestão têm levado à perda de biodiversidade e degradação dos solos nas áreas vitícolas (Bansal et al., 2024; Cataldo et al., 2020; Novara et al., 2018; Visconti et al., 2024). A erosão do solo, o uso excessivo de

pesticidas e fertilizantes sintéticos, além da gestão intensiva do solo, são fatores que reduzem a qualidade do mesmo e a sua capacidade de suportar comunidades microbianas essenciais para a saúde das plantas (O'Brien et al., 2025).

A compactação do solo, em vinha resulta principalmente do tráfego de máquinas pesadas e da mobilização intensiva do solo, o que reduz a porosidade e a infiltração da água. Esse fenómeno dificulta o crescimento das raízes e limita a circulação de ar e água no perfil do solo, o que afeta a atividade microbiana que por sua vez impacta negativamente a funcionalidade do ecossistema, comprometendo processos como o ciclo de nutrientes e a resistência a pragas e doenças (Bansal et al., 2024). Como consequência, as videiras encontram maiores dificuldades na absorção de nutrientes e tornam-se mais dependentes de inputs externos, reduzindo a resiliência do sistema vitícola (Visconti et al., 2024).

Outro desafio importante, colocado ao solo, é o uso excessivo de fertilizantes minerais e pesticidas sintéticos. Embora contribuam para aumentar temporariamente a produção e proteger a cultura, o seu uso em excesso e de forma continuada provoca alterações químicas e biológicas no solo. Aumenta o risco de acidificação e salinização, e afeta negativamente a microbiota edáfica, reduzindo a diversidade e a funcionalidade dos microrganismos benéficos, que por sua vez compromete a saúde do solo e a sua capacidade de sustentar a vinha de forma equilibrada, conduzindo a uma dependência ainda maior de fertilização química e ao risco de contaminação das águas subterrâneas (Visconti et al., 2024).

A erosão hídrica é considerada uma das formas mais graves de degradação dos solos vitícolas, sobretudo em áreas de montanha. Num estudo em vinhas da Sicília (Novara et al., 2018), foram registadas taxas médias de erosão de  $16 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , observando-se também perda de carbono orgânico no solo e, consequentemente, a redução da fertilidade do solo ao longo da encosta em 40%. Estando estes resultados associados a práticas como a mobilização frequente, ausência de cobertura vegetal e orientação das linhas de plantação no sentido da inclinação do terreno, em Portugal designadas por vinhas ao alto, que ocorrem igualmente noutros países do Mediterrâneo. As alterações climáticas, que já se fazem sentir e que tendem a intensificar-se, atuam como um fator de agravamento. Eventos extremos, como chuvas intensas, por vezes na forma de granizo, secas prolongadas, e ondas de calor intensificam a erosão, aceleram a perda de carbono do solo e favorecem a desertificação em áreas vitícolas vulneráveis. Além disso, a variabilidade e imprevisibilidade das condições climáticas altera os padrões de crescimento da vinha e reduz a estabilidade da produção. Solos já

degradados apresentam uma menor capacidade de adaptação, aumentando por consequência o risco para a sustentabilidade da viticultura (Novara et al., 2018; Visconti et al., 2024).

As culturas perenes como as videiras constituem uma grande componente da superfície de cultivo destas áreas, representando, neste sentido, a gestão do solo das vinhas uma oportunidade para conservar os recursos do solo e promover a sustentabilidade do sector (Bansal et al., 2024). As vinhas presentes em regiões do Mediterrâneo são normalmente geridas através da mobilização total do solo, o que significa que o solo está praticamente descoberto, pois as próprias videiras, organizadas em linha, oferecem pouca proteção à maior parte da área de solo que ocupam. Esta prática foi tradicionalmente adotada para reduzir a competição por água e nutrientes, entre videiras e outras plantas e facilitar a gestão da vinha, no entanto tal prática leva a um solo mais suscetível à erosão, à perda de nutrientes por lixiviação, e em caso de seca ao uso ineficiente da água, problema principalmente presente em clima mediterrâneo.

A falta de cobertura vegetal é, portanto, um fator-chave na erosão do solo de vinhedos, um dos principais problemas que afetam as áreas vitícolas (Ruiz-Colmenero et al., 2011). A construção de terraços tem sido, uma prática tradicionalmente reconhecida em regiões vitícolas com declives acentuados. Estudos recentes destacam a importância dos terraços na conservação do solo, e da água no solo, em vinhas plantadas em encostas íngremes. Uma comparação massiva de 50 vinhedos analisou o impacto dos terraços na conservação do solo e da água, evidenciando a relevância dessa prática em terrenos inclinados (Pijl et al., 2022).

Desde a época romana que as culturas de cobertura têm sido utilizadas como adubo verde nas vinhas, onde se semeavam tremoços brancos, trevos ou outras leguminosas. No entanto, a especialização dos sistemas de cultivo iniciada no século XIX, e a posterior intensificação da viticultura no século XX, diminuíram a sua importância em favor da utilização de fertilizantes minerais e da mobilização mecânica (Ochoa-Hueso et al., 2024). Atualmente, com o declínio da qualidade ambiental, da biodiversidade e da produção agrícola devido a práticas agrícolas convencionais, os métodos de agricultura de conservação que promovem a agricultura sustentável e apoiam os serviços dos ecossistemas tornaram-se relevantes. Neste sentido, o cultivo com a utilização de culturas de cobertura do solo, uma antiga prática de gestão, está novamente a tornar-se popular em todo o mundo (Adetunji et al., 2020).

A nova Política Agrícola Comum (PAC) para 2023-2027 (CAP - Confederação dos Agricultores de Portugal, 2023) reconhece a importância das culturas de cobertura na promoção de práticas agrícolas sustentáveis. Portugal, no seu Plano Estratégico da PAC, incentiva a adoção de culturas de cobertura como parte das práticas agrícolas sustentáveis. Estas práticas são apoiadas tanto através de pagamentos diretos como de medidas de desenvolvimento rural, alinhando-se com os objetivos ambientais e climáticos estabelecidos pela União Europeia (Smit, 2019).

Técnicas conservadoras de gestão do solo, como por exemplo o plantio direto das culturas, evitando mobilização excessiva do solo, a manutenção de coberturas vegetais e a incorporação de matéria orgânica através dos resíduos das culturas, em contraste com a mobilização intensiva do solo, ajudam a preservar o solo e promovem um equilíbrio sustentável entre a vinha e o ambiente envolvente (Cataldo et al., 2020; De Bernardi et al., 2025; Ochoa-Hueso et al., 2024; Visconti et al., 2024; Warren Raffa et al., 2021).

Vários estudos têm reportado um efeito positivo, da utilização de culturas de cobertura, nas propriedades físicas e químicas do solo, bem como benefícios biológicos. (Adetunji et al., 2020; Ball et al., 2020; Barbosa et al., 2025; Cazzaniga et al., 2023; Çerçioğlu et al., 2025; García-González et al., 2018; Koudahe et al., 2022; Teixeira et al., 2025; Thapa et al., 2022). Esta técnica foi inicialmente implementada em vinhas de regiões com climas húmidos, sendo aplicada com o propósito de diminuir a humidade do solo e, assim, controlar o vigor das videiras (Ruiz-Colmenero et al., 2011). A utilização de culturas de cobertura em vinha tem sido, portanto, estudada de forma a combater alguns dos principais problemas que as vinhas enfrentam (Fernando et al., 2024; Gatti et al., 2022; Vanden Heuvel & Centinari, 2021).

Esta prática aumenta a complexidade das redes microbianas do solo, contribuindo para uma maior biodiversidade e funcionalidade ecológica. Além disso, melhora a infiltração da água e aumenta, também, a matéria orgânica no solo, promovendo a retenção de água, essencial para as videiras (Bansal et al., 2024; Barbosa et al., 2025; Ruiz-Colmenero et al., 2011). A utilização de culturas de cobertura reduz, também, o risco de lixiviação de nitratos ao reduzir o teor de N inorgânico nos primeiros metros do perfil do solo, absorvendo os nutrientes antes de estes serem percolados e retendo-os na sua biomassa, acima ou abaixo do solo. Em solos degradados as culturas de cobertura podem assim, ao fim de alguns anos, melhorar a qualidade dos mesmos (García-González et al., 2018).

As culturas de cobertura, quando bem geridas, podem também mitigar os efeitos das alterações climáticas através de dois mecanismos principais: sequestro de carbono no solo e redução de emissões provenientes da produção de fertilizantes (quando a própria cultura de cobertura é utilizada como adubo verde reduzindo, portanto, o uso de fertilizantes ou das emissões a partir do solo através do processo de desnitrificação. Em vinicultura isto acontece quando são utilizadas espécies fixadoras de azoto e no fim da estação de crescimento as mesmas são incorporadas na biomassa no solo. (Kaye & Quemada, 2017). O uso contínuo de culturas de cobertura pode inclusivamente contribuir positivamente para a melhoria da qualidade das águas, pelas razões acima mencionadas, nomeadamente através da redução dos “inputs” e da percolação de nutrientes no solo (García-González et al., 2018). Segundo os mesmos autores, o uso contínuo de cevada e ervilhaca como cobertos de inverno mitigou o risco de lixiviação de nitratos, reduzindo o teor de azoto inorgânico no perfil do solo até 4 m de profundidade, promovendo melhorias nos stocks de carbono e azoto e na qualidade do solo e da água. Essa retenção de nutrientes resulta da capacidade das culturas de cobertura de absorver o azoto residual após a colheita e reduzir as perdas por lixiviação, evitando a contaminação das águas subterrâneas e superficiais.

De forma complementar, Kaye e Quemada (Kaye & Quemada, 2017) sintetizam meta-análises internacionais mostrando reduções médias de 40% na lixiviação de nitratos em sistemas com cobertos vegetais, sobretudo em regiões irrigadas ou húmidas (Quemada et al., 2013; Tonitto et al., 2006). Essa redução traduz-se numa menor contaminação das águas e maior eficiência no uso de nutrientes, reforçando que a cobertura vegetal contínua beneficia simultaneamente a qualidade do solo, a qualidade da água e a mitigação e adaptação às alterações climáticas.

As culturas de cobertura desempenham também um papel importante na gestão de pragas (Lazcano et al., 2020). De acordo com (Beaumelle et al., 2021), o aumento da diversidade das culturas de cobertura reforça o controlo biológico de pragas, ao sustentar populações maiores de inimigos naturais, como predadores e vespas parasíticas, uma vez que as culturas de cobertura diversificadas fornecem recursos essenciais, como abrigo, néctar, pólen e presas alternativas, ajudando a manter as populações de predadores ao longo de toda a estação. Neste estudo a diversidade de culturas de cobertura foi manipulada (2 vs 20 espécies de plantas) em nove pares de vinhas localizadas ao longo de um gradiente de paisagem, que variava entre 20 a 60% de habitats seminaturais. Neste estudo foram, também, amostrados os inimigos naturais para avaliar o potencial controlo de pragas. Foi observando um aumento significativo

(140%) na abundância de predadores em vinhedos com culturas de cobertura diversas, particularmente em paisagens mais simples (com menos de 50% de habitat seminatural) em comparação com paisagens mais complexas.

Esta é uma prática de gestão simples, versátil e aparentemente acessível, sendo, portanto, apelativa como estratégia integrada de conservação do solo e gestão ecológica de pragas, contribuindo simultaneamente para a sustentabilidade e a resiliência de agroecossistemas.

## **1.2. Culturas de cobertura: características, gestão e benefícios**

De acordo com a sua origem, as culturas de cobertura podem ser semeadas ou espontâneas. Na sementeira são geralmente utilizadas misturas de espécies, mas pode-se também recorrer a monoculturas. As culturas de cobertura podem também ser classificadas como anuais, bianuais ou perenes, de acordo com a duração do ciclo de vida das plantas (Cherubin, 2022; Scavo et al., 2022). As culturas anuais completam todo o seu ciclo de vida num único ano, enquanto que as bianuais levam dois anos, sendo necessário repetir a sua sementeira no final do seu ciclo de vida, permitindo também a sua posterior incorporação no solo (Kaye & Quemada, 2017). As culturas perenes, por sua vez, têm um ciclo de vida com uma duração superior a dois anos, exigindo, portanto, menor manutenção. No entanto a sua gestão também pode por vezes incluir o seu corte ou destruição através da mobilização do solo ou aplicação de herbicidas (Abad et al., 2021; Barbosa et al., 2025). As espécies utilizadas como cultura de cobertura são sobretudo leguminosas ou gramíneas (Barbosa et al., 2025), no entanto, são designadas por cultura de cobertura, quaisquer culturas, que cobrem o solo e são introduzidas num sistema de cultura anual ou perene, como vinha e/ou pomar, com o objetivo de prestar serviços agroecossistémicos (Dzvene et al., 2023).

As principais misturas (consociações) de culturas de cobertura utilizadas em vinhas no norte de Portugal, e em regiões mediterrânicas semelhantes, incluem diferentes combinações de leguminosas, gramíneas, brassicáceas e até misturas florais, cada uma com os seus benefícios específicos. As leguminosas, como o trevo ou o tremço, destacam-se pela capacidade de fixar azoto atmosférico, o que melhora a fertilidade do solo e reduz a necessidade de fertilizantes sintéticos (Abad et al., 2021; Carranca, 2022). Já as gramíneas, como a aveia e o centeio, são utilizadas principalmente para aumentar a matéria orgânica e o carbono orgânico do solo,

melhorando a sua estrutura física e controlando a erosão superficial (Abad et al., 2021; Carranca, 2022).

Misturas que combinam gramíneas e leguminosas (culturas anuais), reúnem os benefícios das duas famílias, resultando em coberturas mais densas e eficazes no controlo de ervas daninhas, podendo até diversificar a disponibilidade de nutrientes e qualidade da camada fértil do solo, bem como melhorar a sua saúde e resiliência geral (Abad et al., 2021; Thapa et al., 2022). Em algumas vinhas, também se implementam misturas com plantas florais, ao longo das bordaduras, para atrair polinizadores e inimigos naturais de pragas, ampliando assim a biodiversidade funcional na vinha (Carranca, 2022).

No entanto, considerando toda a diversidade de culturas de cobertura, e tendo em conta que alguns fatores adicionais afetam certamente o seu impacto nas culturas produtivas, como a variação do clima, o tipo de solo, e a frequência de irrigação, é muito relevante examinar detalhadamente o equilíbrio entre as suas potenciais vantagens e desvantagens (Koudahe et al., 2022), antes da sua adoção para uma determinada situação. Segundo Scavo et al. (Scavo et al., 2022), a escolha das espécies de culturas de cobertura deve basear-se na adaptação ao clima, tipo de solo, práticas agronómicas e objetivos específicos de gestão, uma vez que a performance das plantas depende fortemente da precipitação anual, disponibilidade de água no solo, pH, textura e fertilidade. Os autores salientam que, em regiões húmidas e frias, predominam as espécies anuais de inverno, como *Avena sativa*, *Secale cereale* e *Trifolium incarnatum*, que garantem elevada produção de biomassa e rápida cobertura do solo. Em contrapartida, em zonas secas ou com baixa precipitação, são mais adequadas as espécies com raízes profundas e elevada tolerância à seca, como *Vicia villosa* e *Brassica napus*. Além disso, leguminosas adaptadas a solos ácidos, como *Vicia sativa* e *Trifolium subterraneum*, apresentam melhor desempenho em ambientes de baixa fertilidade, enquanto gramíneas como *Lolium multiflorum* e *Festuca arundinacea* são mais produtivas em solos neutros ou calcários.

De acordo, também, com Barbosa et al. (Barbosa et al., 2025), as leguminosas perenes, como *Trifolium repens* e *T. pratense*, são preferidas em solos férteis, com pH neutro a ligeiramente ácido (6,0 a 7,0), comuns em regiões temperadas húmidas, onde formam uma cobertura densa durante o inverno e contribuem para a fixação biológica de azoto. Por sua vez, as gramíneas de inverno, como *Secale cereale* (centeio) e *Avena sativa*, são indicadas para solos pobres ou arenosos, apresentando elevada tolerância ao frio e ao alumínio tóxico, sendo eficazes na redução da erosão e na melhoria da

estrutura do solo (Barbosa et al., 2025b; Scavo et al., 2022). Ainda segundo Barbosa et al. (Barbosa et al., 2025b), a ervilhaca comum (*Vicia sativa*) é recomendada para solos argilosos e de fertilidade média, destacando-se como uma excelente fixadora de azoto e promotora da atividade microbiana. Já as brassicáceas, como *Raphanus sativus* e *Sinapis alba*, são ideais em condições de compactação do solo ou quando se pretende promover a mobilização de nutrientes, contribuindo para a descompactação e ciclagem de nutrientes (Barbosa et al., 2025b; Scavo et al., 2022).

A título de exemplo a espécie *Phacelia tanacetifolia* (planta nativa) foi sugerida para ser usada nas entrelinhas de uma vinha de uva de mesa no Vale Central da Califórnia (Fernando et al., 2024). Os autores partiram da hipótese de que esta espécie nativa estaria melhor adaptada ao clima local e teria maior probabilidade de sustentar relações mutualistas e simbióticas com a biota da paisagem, podendo, assim, apresentar melhores resultados como cultura de cobertura para a saúde do solo e o vigor da videira. O estudo foi conduzido através da introdução de duas misturas de culturas: uma mistura de espécies nativas e uma mistura de espécies não nativas. Para cada mistura, dominou uma espécie específica (mais de 90%), por este motivo o estudo centrou-se na comparação entre a *Phacelia tanacetifolia* (espécie nativa) e o centeio (*Secale cereale* L. 'Merced' – espécie não nativa/introduzida). Os autores constataram, portanto, que a cobertura do solo com esta espécie nativa melhorou de forma geral a eficiência do uso da água, tendo sido observado que, nas parcelas com cobertura nativa, o solo mantinha maior teor de humidade, após os eventos de rega, comparativamente às parcelas com solo nu, aumentando assim a capacidade do solo reter água por unidade de irrigação aplicada, evidenciando, portanto, uma utilização mais eficaz da água disponível. Além disso a espécie nativa utilizada apresentou ainda raízes profundas e um sistema radicular denso, promovendo maior porosidade e condutividade hidráulica no solo, resultando num aumento da humidade do solo sob as videiras, da biomassa microbiana e da estabilidade dos agregados do solo, que são igualmente indicadores de uma melhor saúde do solo. Inclusivamente os autores constataram que a introdução das culturas de cobertura não reduziu a produtividade, pelo contrário, ajudou a manter o vigor das plantas, sem efeitos negativos imediatos na produção. *Phacelia tanacetifolia* inclusivamente aumentou o vigor das videiras jovens, enquanto o centeio teve um efeito menos marcado. Foi assim sugerido que esta espécie nativa poderá ser a melhor escolha para vinhas de clima mediterrâneo, em alternativa à introdução do centeio.

Numa vinha biológica, no noroeste da Itália, foram comparadas cinco práticas diferentes, utilizando espécies nativas, enrelvamento espontâneo sem mobilização, mobilização, alternância de entrelinhas com mobilização e enrelvamento espontâneo sem mobilização, alternância de enrelvamento espontâneo sem mobilização com cultura de cobertura de inverno e enrelvamento espontâneo temporário (Gatti et al., 2022). As práticas de gestão com enrelvamento alternado com cobertura de inverno ou enrelvamento com espécies anuais foram consideradas eficazes para melhorar a produtividade e composição das uvas, no entanto os autores observaram uma redução da produção por videira, quando mantiveram o enrelvamento permanente, em comparação com a mobilização. Em relação ao vigor das videiras foi também observado que o enrelvamento espontâneo sem mobilização resultou em menor área foliar e menor peso de poda, sobretudo nos ramos laterais, comparado com mobilização total, enquanto que as práticas de coberto parcial (alternância de entrelinhas com mobilização e enrelvamento espontâneo sem mobilização, alternância de enrelvamento espontâneo sem mobilização com cultura de cobertura de inverno e enrelvamento espontâneo temporário) mantiveram um vigor intermédio, mais equilibrado entre crescimento e produção. Adicionalmente as videiras sob enrelvamento espontâneo permanente produziram uvas com maior teor de açúcares, maior concentração de antocianinas e compostos fenólicos, embora com algumas limitações, nomeadamente menor azoto assimilável pelas leveduras e menor teor de ácido málico. Os tratamentos de coberto parcial, por sua vez, mostraram ser os mais equilibrados, assegurando bons níveis de maturação sem comprometer o rendimento, com destaque para a alternância de enrelvamento espontâneo sem mobilização com cultura de cobertura de inverno e enrelvamento espontâneo temporário.

No que diz respeito ao solo na linha da videira, uma revisão científica (Vanden Heuvel & Centinari, 2021) concluiu que a utilização de culturas de cobertura ajuda a reduzir os efeitos negativos da chuva intensa, como a erosão do solo e o escoamento e consequente perda de nutrientes, ao proteger o solo do impacto direto da chuva, bem como a redução dos custos de manutenção da própria vinha, como a utilização de herbicidas e práticas mecânicas como a mobilização. Os autores baseiam esta última conclusão em diversos estudos de campo realizados em regiões vitivinícolas húmidas, nomeadamente no nordeste dos Estados Unidos. Em experiências conduzidas por Karl et al. (Karl et al., 2016), compararam-se diferentes métodos de gestão do solo sob a linha da videira: a aplicação de herbicidas, mobilização mecânica e a instalação de culturas de cobertura. Os resultados demonstraram que os custos anuais de

manutenção foram substancialmente inferiores nos sistemas com culturas de cobertura na linha da videira. Cerca de 84 a 169 dólares por hectare, dependendo da espécie utilizada (vegetação natural ou trevo-branco), em contraste com 548 dólares por hectare para o uso de herbicidas e 1036 dólares por hectare para a mobilização do solo. Assim, a presença de vegetação sob a videira permitiu reduções de 70 a 90% nos custos operacionais, sobretudo pela eliminação das aplicações químicas e pelo menor consumo de combustível e maquinaria. Adicionalmente, quando o trevo branco e a vegetação natural foram utilizados como cultura de cobertura, numa vinha jovem, o peso da poda foi reduzido em aproximadamente 50% no quinto ano, em comparação com as parcelas mantidas com herbicida sob as videiras.

A revisão destaca também a contribuição das culturas de cobertura para o aumento da matéria orgânica e diversidade microbiana do solo o que melhora a estabilidade dos agregados e a capacidade de retenção de água, beneficiando o ecossistema da vinha. Estas culturas podem também limitar o crescimento excessivo da vegetação das videiras, ajudando a reduzir a incidência de doenças nas frutas e melhorando a qualidade das uvas, e reduzindo, portanto, a necessidade do uso de agroquímicos. No entanto salienta também como a seleção de espécies de cobertura e as suas práticas de gestão influenciam a eficácia destas culturas, destacando a necessidade de adaptar as estratégias de gestão às condições locais e aos objetivos de produção dos viticultores.

Adicionalmente, outro estudo (Radicetti et al., 2013) sugere que a conversão dos resíduos das culturas de cobertura em mulching superficial pode representar uma abordagem mais sustentável de gestão de plantas invasoras/infestantes comparada à sua incorporação como adubo verde. O estudo demonstrou que deixar os resíduos de culturas de cobertura na superfície do solo reduziu significativamente a densidade de plantas invasoras em comparação com a incorporação dos resíduos como adubo verde, embora a diversidade de espécies nem sempre tenha diminuído. Destaca-se também que práticas tradicionais de gestão da cobertura do solo afetam diretamente a diversidade de plantas em vinhedos. O corte ou o tombamento das culturas de cobertura favorece uma maior riqueza de espécies bem como a presença de espécies nativas, que crescem de forma espontânea, enquanto o uso de herbicidas e a lavoura reduz essa diversidade, promovendo espécies mais competitivas e menos diversas (Guerra et al., 2022). As espécies nativas que crescem de forma espontânea contribuem para a conservação de habitats de interesse europeu, como os habitats Natura 2000. A conservação deste tipo de habitats é uma prioridade para a União Europeia, em

conformidade com a Diretiva Habitats, sendo que numa altura em que estes ecossistemas estão a ser ameaçados, uma gestão adequada das vinhas mediterrânicas pode ser uma alternativa para a sua conservação, uma vez que serviriam de refúgio para muitas destas espécies, nomeadamente espécies terofíticas de pastagens (Guerra et al., 2022).

Estudos realizados em sistemas agrícolas mediterrânicos (Radicetti, Mancinelli & Campiglia, 2013) demonstram que espécies como *Papaver rhoeas* (papoila), *Fumaria officinalis* (fumarária), *Sinapis arvensis* (mostarda-brava), *Stellaria media* (morrião-dos-pássaros), *Veronica persica*, *Galium aparine* (amor-de-hortelão), *Rumex crispus* (labaça-enrolada), *Polygonum aviculare* (tanchagem-de-pássaros) e *Sonchus oleraceus* (serralha) são componentes característicos da vegetação espontânea dos campos agrícolas. Estas espécies, muitas vezes consideradas “ervas daninhas”, desempenham papéis ecológicos relevantes, como o fornecimento de alimento e abrigo a insetos polinizadores e aves, contribuindo para a manutenção da biodiversidade e da funcionalidade ecológica de agroecossistemas.

Enquanto as espécies nativas promovem uma maior diversidade e servem como refúgio para várias espécies de plantas e animais, a introdução de novas espécies pode não oferecer os mesmos benefícios ecológicos bem como resultar em competição ou até mesmo na substituição de espécies nativas, afetando negativamente a biodiversidade local.

As culturas de cobertura oferecem uma estratégia promissora para enfrentar muitos dos problemas presentes no setor agrícola/vinícola de hoje, mas a sua implementação eficaz requer uma análise e um planeamento cuidadoso. Em regiões com baixa precipitação, por exemplo, o uso de culturas de cobertura pode aumentar a competição por água, o que pode ser prejudicial (Ruiz-Colmenero et al., 2011). A implementação de culturas de cobertura, apesar de apresentar benefícios a nível de gestão, a longo prazo, pode implicar também custos iniciais de estabelecimento e gestão. Inclusivamente, muitas das melhorias no solo e na saúde das plantas ocorrem ao longo do tempo, neste sentido, estudos de longo prazo são essenciais para entender os seus efeitos a todos os níveis, incluindo viabilidade económica da prática a longo prazo.

No contexto acima descrito, este trabalho teve como principal objetivo avaliar o impacto de diferentes cobertos vegetais e modos de gestão do solo na entrelinha (mobilização, não mobilização/vegetação espontânea e sementeira de 6 misturas diferentes, 3 de longa duração e 3 anuais) na saúde do solo de uma vinha localizada na

Estação Amândio Galhano, gerida pela Comissão Vitivinícola da Região dos Vinhos Verdes (CVRVV) localizada em Arcos de Valdevez, Norte de Portugal.

Para alcançar este objetivo global definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- i) avaliar o impacto de diferentes cobertos vegetais e modos de gestão do solo na entrelinha (mobilização, não mobilização/vegetação espontânea e sementeira de 6 misturas diferentes comercializadas pela Fertiprado: 3 de longa duração, de acordo com a empresa, e 3 de espécies anuais) na saúde do solo de uma vinha através de uma bateria de indicadores físico-químicos do solo (densidade aparente, capacidade máxima de retenção de água, pH, condutividade elétrica, fósforo disponível, carbono orgânico);
- ii) avaliar a comunidade microbiana do solo (atividade metabólica e diversidade funcional);
- iii) efetuar um levantamento florístico nas entrelinhas experimentais;
- iv) identificar as vantagens da sementeira face à vegetação nativa.

## 2. Enquadramento

### 2.1. Caracterização da Região Demarcada dos Vinhos Verdes

A cultura da vinha na região dos Vinhos Verdes tem tradições remotas. As referências mais antigas, referentes à sua produção, remontam à época romana, no entanto a mais antiga menção conhecida, como “Vinho Verde”, surge apenas em 1606, num documento da Câmara do Porto (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2024).

Com uma área de cerca de 24000 hectares, a região dos Vinhos Verdes, situa-se no extremo Norte de Portugal continental, na região tradicionalmente designada por Entre-Douro-e-Minho. Esta região é delimitada a Norte pelo rio Minho, estendendo-se pela costa atlântica até à cidade do Porto, sendo que a Este e a Sul se erguem zonas montanhosas que formam uma barreira natural em relação às áreas mais interiores do país (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2024; Wines of Portugal, 2025). Esta região demarcada foi criada em 1908, sendo a carta de lei de 18 de setembro de 1908 que a delimita geograficamente, através da atribuição da respetiva demarcação e explica o que se deve entender por vinho verde, definindo ainda as práticas culturais e as castas características. Esta é considerada uma das mais antigas regiões vitivinícolas reconhecidas em Portugal (Helder Marques, 1987; IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2024). É caracterizada por uma influência atlântica extrema, uma paisagem verde e

húmida, com chuvas abundantes (aproximadamente 1200 a 1500 mm/ano) e temperaturas frescas, com uma média anual de aproximadamente 14,2 °C (Aveleda, 2025; Climaco et al., 2012; Clube Vinhos Portugueses, 2014). As vinhas concentram-se ao longo dos vales dos rios principais, e os solos são maioritariamente graníticos, com exceção de duas estreitas faixas que a cruzam no sentido noroeste-sudeste: uma de origem silúrica, com presença de formações carboníferas e de lousa, e outra constituída por xistos arcaicos. Os solos apresentam textura arenosa a franco-arenosa, pouca profundidade, acidez acentuada, baixa disponibilidade de fósforo e riqueza em potássio. (Aveleda, 2025; Climaco P. et al., 2012; Clube Vinhos Portugueses, 2014; Infovini, 2025a; IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2024)

A denominação divide-se em nove sub-regiões distintas: Monção, Lima, Basto, Cávado, Ave, Amarante, Baião, Sousa e Paiva (IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, 2024) (Figura 1).



Localizada numa propriedade de 66 hectares ao longo da margem direita do Rio Lima, em Arcos de Valdevez, a EVAG tem cerca de 26 ha de vinha, incluindo 56 variedades de uvas regionais, 15 ha de floresta, 7 ha para viveiros e 10 parcelas em pousio, bem como, 8 ha de áreas sociais. Neste momento a EVAG dedica-se a vários setores como a agricultura, a silvicultura e a piscicultura, focando-se principalmente na viticultura e vinificação, além disso, promove também projetos de turismo rural e agrícola, contribuindo, desta forma, para o contínuo desenvolvimento e modernização da viticultura na Região Demarcada dos Vinhos Verdes (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025-b).

A sub-região do Lima, que inclui o concelho de Arcos de Valdevez, apresenta amplitudes térmicas intermédias relativamente às restantes sub-regiões, mas é a que regista maior precipitação. A altitude das vinhas aumenta do litoral para o interior, criando microclimas no vale do Lima. Tal como no Cávado, coexistem solos graníticos e, em menor extensão, solos xistosos (Vinhos Verdes, 2025). Segundo a Carta de Ocupação do Solo de 2012 (Figura 2), Arcos de Valdevez apresenta uma ocupação diversificada: o tecido urbano ocupa 3,7% da área total, sendo os matos e incultos predominantes (60%), as culturas agrícolas cobrem cerca de 18,7% do território, sobretudo em áreas baixas junto ao rio Vez, os povoamentos florestais ocupam 17,1% em solos de meia encosta (CMAV - Câmara Municipal de Arcos de Valdevez, 2025).

Os vinhos brancos mais conhecidos da sub-região do Lima são da casta Loureiro, com aromas finos e elegantes, cítricos e florais. As castas Arinto e Trajadura também estão bem difundidas, adaptando-se a climas amenos influenciados pelos ventos marítimos. Os vinhos tintos, produzidos principalmente a partir das castas Vinhão e Borraçal, apresentam melhor potencial nas zonas interiores, devido às condições climáticas favoráveis à maturação (Vinhos Verdes, 2025).

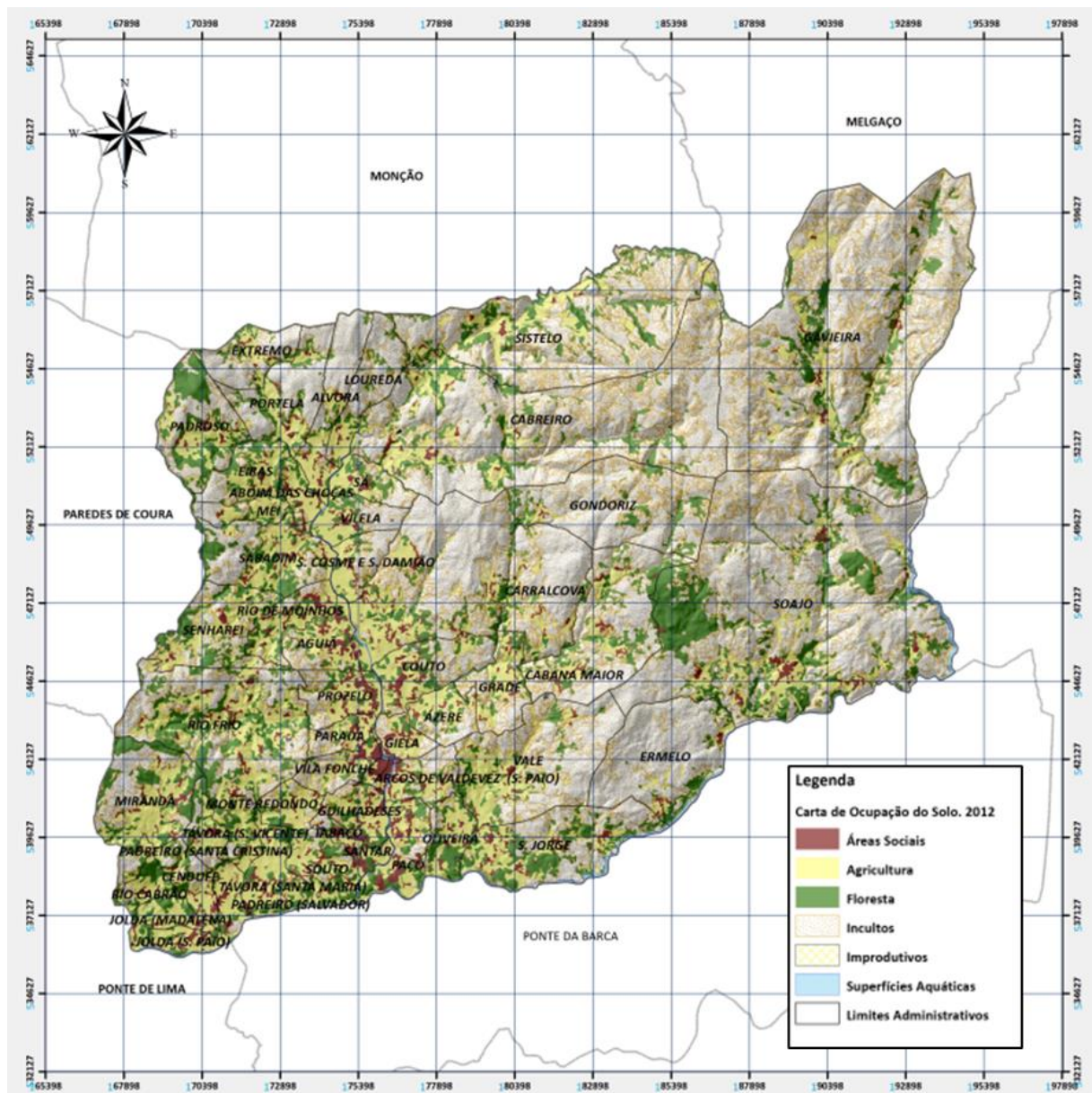


Figura 2 - Carta de ocupação do Solo de Arcos de Valdevez, ICNF (2014)

A combinação de montanhas, ventos atlânticos e solos graníticos bem drenados cria condições para vinhos frescos, leves e bem estruturados, beneficiando das elevadas precipitações e das distintas amplitudes térmicas diárias na estação quente (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025-a).

### 2.3. Principais doenças associadas à vinha na região dos Vinhos Verdes

O clima da região dos Vinhos Verdes previamente caracterizado, tem-se manifestado favorável a uma maior incidência de doenças fúngicas, destacando-se doenças como o míldio (*Plasmopara viticola*), o oídio (*Uncinula necator*), a podridão cinzenta (*Botrytis cinerea*), a esca, a escoriose (*Phomopsis viticola*) e a eutipiose (*Eutypa lata*) que constituem as principais ameaças à sanidade das videiras e à qualidade da produção vitivinícola.

*Plasmopara viticola*, é o principal agente infecioso da da videira na região dos vinhos verdes, responsável pelo míldio. Esta provoca estragos com elevado impacto na produção, destruindo inflorescências (pré-floração) e cachos (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). Este fungo conserva-se durante o Inverno, permanecendo nas folhas mortas ou no próprio solo, sob a forma de oósporos, os quais com o auxílio de gotículas de chuva e vento atingem as plantas. Como muitas outras doenças, esta desenvolve-se em condições climáticas caracterizadas por temperaturas amenas, chuva e humidade relativa elevada, sendo, portanto, a Primavera a estação do ano onde as condições são mais favoráveis ao seu desenvolvimento. Nestas condições surgem macroconídios que libertam zoósporos biflagelados, que penetram os estomas (Infovini, 2025b). A partir destas infeções primárias (“manchas de óleo” na página superior das folhas com uma correspondente mancha branca na página inferior) *P. viticola* reproduz-se, dando por sua vez origem a infeções secundárias, de forma recorrente desde que as condições ambientais o permitam (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). A contaminação por infeção primária tem lugar quando as temperaturas são superiores a 10°C, e a precipitação é de, no mínimo, 10 mm durante um ou dois dias (Fisher et al., 2007; Gessler Cesare et al., 2011; Mezei et al., 2022), sendo as zonas mais húmidas da vinha e as folhas próximas do solo, as zonas de maior risco. No caso das infeções secundárias basta os órgãos verdes da videira ficarem húmidos durante um curto espaço de tempo, cerca de 2 a 3 horas para que estas ocorram (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). Dado que o único meio de combate atualmente eficaz é o químico, a estratégia de proteção passa inevitavelmente por tratamentos, que podem ter uma ação preventiva (fungicidas de contacto), através da aplicação do fungicida foliar de contacto de forma a impedir a evolução dos zoósporos e/ou curativa com um fungicida sistémico, para interromper o desenvolvimento do micélio (Infovini, 2025b).

*Uncinula necator*, agente do oídio, é responsável pela doença mais combatida a nível nacional, que, no entanto, nesta região não tem a mesma representatividade,

possivelmente em virtude das Primaveras habitualmente chuvosas, surgindo apenas entre a floração e o pintor (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). Como ectoparasita, o micélio localiza-se no exterior dos tecidos vegetais, sendo que na primavera, liberta uma grande quantidade de conídios, os cleistotecas, que por sua vez, rebentam libertando os ascos com os ascósporos. Pela ação do vento, estes, contaminam qualquer órgão verde da videira constituindo as infeções primárias do fungo. As infeções secundárias, correspondem a ciclos de germinação de conídios e ascósporos, que se sucedem durante todo o período vegetativo (Infovini, 2025b). O oídio desenvolve-se entre os 5 e os 40°C de temperatura, aumentando o seu crescimento a partir dos 15°C. A partir de um valor de humidade relativa do ar de 25%, quanto mais elevadas as temperaturas mais quantidade de conídios se formam (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). Apesar da formação de conídios depender da humidade, não depende propriamente de chuvas abundantes (caso do míldio), sendo que estas chuvas podem mesmo “lavar” os conídios. Este facto justifica a sensibilidade da videira ao oídio em regiões mais quentes, onde a precipitação é reduzida (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). O único meio atualmente eficaz de combate ao oídio é o químico, sendo o enxofre, o produto mais utilizado no seu controlo, de forma preventiva e curativa. A ação do enxofre sobre o fungo resulta da sua volatilização, apresentando uma eficácia que varia consoante a temperatura do ar. Em condições de temperaturas baixas, a sua atuação é limitada, enquanto a temperaturas elevadas (>35 °C) pode causar queimaduras (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c).

A importância de *Botrytis cinerea*, também designada por fungo da podridão cinzenta tem vindo a aumentar progressivamente na região dos vinhos verdes, com o surgimento precoce de ataques na Primavera e de maior intensidade na maturação, resultado de Invernos mais amenos e de Primaveras e Outonos chuvosos, podendo nestes casos atacar folhas e cachos, ainda antes da floração. Este fungo prospera a temperaturas amenas e humidade relativa elevada, sendo que temperaturas inferiores a 10°C impedem o seu desenvolvimento. A humidade constitui um fator determinante para o seu desenvolvimento, sendo este favorecido em situações de vinhas localizadas próximas de cursos de água ou em solos húmidos, com vegetações sombrias e frescas, sendo estas condições ideais à sua proliferação (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). O fungo hiberna nos sarmentos da videira sob a forma de escleroto ou micélio, bem como no solo. Na Primavera, especialmente em condições frescas e húmidas, dão origem a frutificações que produzem uma grande quantidade de esporos

que propagados com o auxílio do vento e/ou salpicos de água infetam os órgãos verdes da videira. Lesões nos órgãos verdes, particularmente nos bagos que exsudam suco, representam vias de entrada privilegiadas para este fungo. Estas lesões podem ter origens climáticas como o granizo, ou resultar de ataques de outros agentes de doença como *Uncinula necator* (bago rachado). As perdas de produção nesta região por ação de *B. cinerea* podem ultrapassar os 50% e o quadro de controlo eficaz é exigente, tanto em número de tratamentos como a nível de custos (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). Atualmente, diversos produtos são utilizados no combate à prodridão cinzenta, tanto com ação preventiva como curativa.

A esca é uma importante doença do lenho atribuída a um conjunto de fungos parasitas, como os fungos basidiomicetas *Stereum hirsutum* e *Phellinus igniarius*, responsáveis pela degradação da madeira, que ao longo do tempo atingiu todas as regiões vitícolas. Hoje acredita-se que a esca se deve a uma ação conjugada de fungos percursoros *Phaeoacremonium aleophilum* e *P. clamydosporum* que destroem a lenhina dos tecidos mortos, e de “fungos da esca” (*Fomitiporia punctata* e *Phellinus igniarius*) que destroem as celulosas, hemicelulosas das paredes vegetais e libertam compostos fenólicos (Infovini, 2025b). Os percursoros são responsáveis por uma necrose escura e dura que envolve a necrose clara mole e podem ser transportados através de material vivo. A infeção é típica de videiras idosas com grandes feridas de poda, pois dá-se por dispersão aérea do fungo, sendo o desenvolvimento do micélio favorecido por chuva intensa e temperaturas elevadas. Na região dos vinhos verdes, são-lhe particularmente sensíveis as castas brancas Alvarinho e Avesso (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). O seu combate passa por diversas práticas como evitar grandes cortes na poda assim como a devida desinfecção das tesouras e das feridas de poda. Por fim é também aconselhada a queima da lenha de poda com mais de dois anos (não deixando, a lenha, por queimar durante muito tempo) (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c).

*Phomopsis viticola*, fungo responsável pela escoriose, ocorre com elevada frequência nas regiões do Vinho Verde, favorecida pelas condições ambientais características, em particular pela precipitação coincidente com o período de surgimento de rebentos, manifestando-se especialmente através da base dos ramos das videiras. A maioria das castas brancas regionais são-lhe sensíveis, com especial destaque para o Loureiro, resultando na quebra dos pâmpanos com muita facilidade. Na presente região, observa-se predominância da “escoriose americana” (*Phomopsis viticola*), ao passo que noutras regiões do país é predominante a “escoriose europeia” (*Macrophoma*

*flaccida*) (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c). O fungo hiberna sob a forma de micélio nos gomos da base do sarmento, e sob a forma de picnídeos nos sarmentos. Com a rebentação os esporos dos picnídeos, estes são facilmente disseminados pelas chuvas infetando as videiras. Temperaturas de 15 a 18°C e tecidos húmidos por um período de 7 a 10 horas consecutivas, são suficientes para a contaminação. Surge pelo uso de varas infetadas na realização dos enxertos e é, também, transmitida pelas tesouras de poda (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c; Infovini, 2025b). Os danos mais significativos desta doença incluem a diminuição da produção, resultante da inviabilização de numerosos gomos basais e/ou da quebra de pâmpanos durante o crescimento ativo. Para o seu combate, é importante, durante a poda, deixar apenas varas sãs, bem como a utilização de varas igualmente sãs na enxertia e rejeição dos gomos da base. A prática de queima das varas infetadas pós-poda, aliada à execução de uma poda longa, permite assegurar o desenvolvimento de gomo não basais, particularmente em videiras severamente atacadas. No controlo químico, utilizam-se fungicidas sintéticos exclusivamente de contacto. Como alternativa, é possível aplicar um único tratamento utilizando um fungicida de ação sistémica (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c; Infovini, 2025b).

*Eutypa lata* agente da eutipiose, é provocada por ascósporos que se desenvolvem em ramos/madeira morta. Este fungo do lenho, caracterizado como parasita de lesão, acede às feridas de poda, invade o tecido vascular da videira e, o seu micélio dissemina-se pelos tecidos circundantes cerca de 4 a 14 dias após a infeção. A eutipiose é uma doença que se espalha facilmente entre as vinhas, e afeta normalmente vinhas adultas ou já envelhecidas (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c; Infovini, 2025b). Este fungo mantém-se sobre a madeira morta, conservando a sua fertilidade por cerca de 5 anos. Assim, as videiras mortas nas parcelas tornam-se fontes de inóculo capazes de contaminar as outras. Neste caso o frio favorece o desenvolvimento da doença, sendo que o fungo entra em atividade após chuvas de pelo menos 5 mm. A sua disseminação é assegurada pelo vento, chegando muitas vezes a alcançar grandes distâncias, até cerca de 60 km, com o fungo mantendo-se viável até dois meses (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c; Infovini, 2025b). De forma análoga à Esca, no combate da eutipiose, são recomendadas medidas essencialmente profiláticas, como a execução tardia de podas, em tempo seco e sem vento, evitar grandes cortes, desinfetar feridas e tesouras e a realização de despampas (Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez, 2025c; Infovini, 2025b).

### 3. Materiais e Métodos

No âmbito deste estudo foi implementado um ensaio de campo na EVAG (Figura 3), coordenado pela CVRVV e pela empresa Fertiprado, com oito tratamentos diferentes, M1, M2, M3, M4, M5, M6, MO e NM. Os tratamentos M1, M2, M3, M4, M5 e M6 consistem em seis sementeiras diferentes da entre-linha constituídas por diferentes espécies de plantas de cobertura, que por sua vez, são aplicadas com diferentes objetivos de conservação da qualidade e de proteção do solo (Tabela 1). Os tratamentos M1, M2 e M3 correspondem a culturas de longa duração, enquanto M4, M5 e M6 correspondem a culturas anuais. A sementeira foi realizada em novembro de 2023 e, no caso das espécies anuais, o solo foi mobilizado e as espécies ressemeadas a 7 de novembro de 2024. Cada uma apresenta quatro réplicas (4 entrelinhas) distribuídas aleatoriamente pelo local de estudo, com exceção da mistura M2 que apenas apresenta três. O tratamento MO corresponde ao solo mobilizado bianualmente, com crescimento de culturas espontâneas, com seis réplicas distribuídas aleatoriamente pela parcela, enquanto que NM corresponde ao solo não mobilizado, também com um crescimento espontâneo de culturas de cobertura e com oito réplicas distribuídas de igual forma (Figura 4).

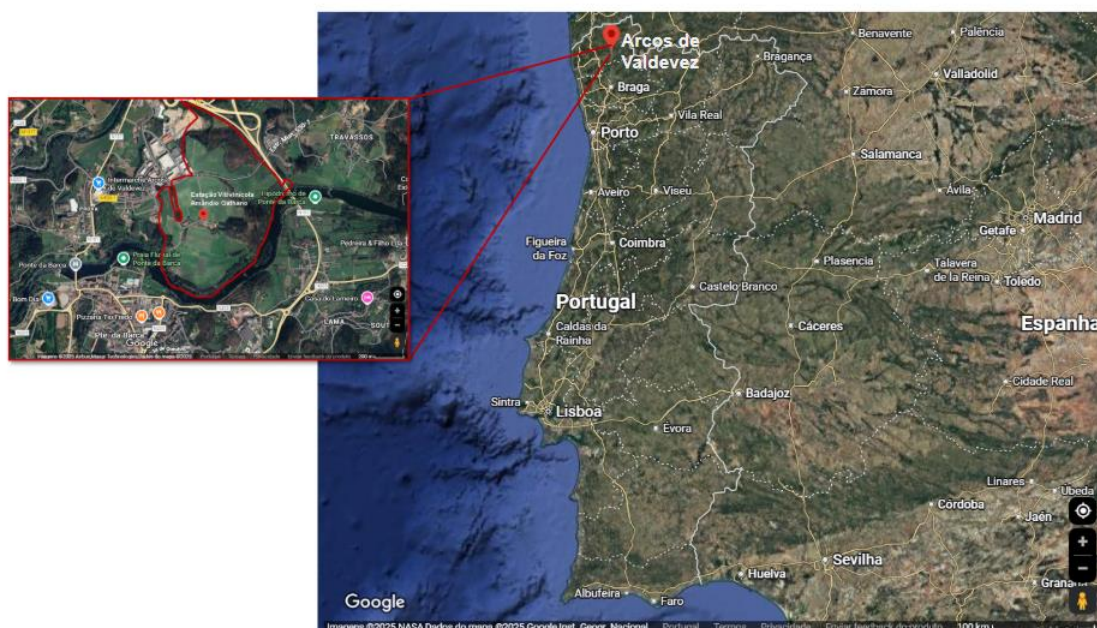


Figura 3 - Mapa de Portugal com a localização, e delimitação a vermelho, da Estação Vitivinícola Amândio Galhano (EVAG), em Arcos de Valdevez (Google Maps, 2025)

Tabela 1 - Espécies presentes em cada uma das misturas testadas, que correspondem aos tratamentos do desenho experimental estabelecido pelos técnicos da EVAG em colaboração com a Fertiprado.

| M1                                                             | M2                                                              | M3                                                                              | M4                                                                                          | M5                                                                                                                                              | M6                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ferticover I LEG AC</b><br><br>(leguminosas de porte baixo) | <b>Ferticover II LEG AC</b><br><br>(leguminosas de porte médio) | <b>Ferticover I LEGRA VERDE</b><br><br>(leguminosas e gramíneas de porte baixo) | <b>Proterra MAX AC</b><br><br>(leguminosas de rápido crescimento, adaptadas a solos ácidos) | <b>Proterra TERRA AC</b><br><br>(leguminosas, gramíneas e crucíferas, com elevada capacidade de produção de biomassa, adaptadas a solos ácidos) | <b>Proterra STRUCTURATO R AC</b><br><br>(leguminosas anuais, crucíferas e gramíneas com sistemas radiculares vigorosos e complementares, adaptadas a solos ácidos) |
| <i>Ornithopus sativus</i>                                      | <i>O. sativus</i>                                               | <i>Lolium perenne</i>                                                           | <i>Lupinus angustifolius</i>                                                                | <i>Avena strigosa</i>                                                                                                                           | <i>A. strigosa</i>                                                                                                                                                 |
| <i>Trifolium michelianum</i>                                   | <i>Trifolium incarnatum</i>                                     | <i>Festuca rubra</i>                                                            | <i>Lupinus luteus</i>                                                                       | <i>Lolium multiflorum</i>                                                                                                                       | <i>L. angustifolius</i>                                                                                                                                            |
| <i>Trifolium spumosum</i>                                      | <i>T. michelianum</i>                                           | <i>Trifolium repens</i>                                                         | <i>O. sativus</i>                                                                           | <i>Lupinus angustifolius</i>                                                                                                                    | <i>L. luteus</i>                                                                                                                                                   |
| <i>Trifolium glanduliferum</i>                                 | <i>T. glanduliferum</i>                                         | <i>Trifolium fragiferum</i>                                                     | <i>T. incarnatum</i>                                                                        | <i>Lupinus luteus</i>                                                                                                                           | <i>R. sativus</i> var. <i>longipinnatus</i>                                                                                                                        |
| <i>Trifolium resupinatum</i> ssp. <i>resupinatum</i>           | <i>T. resupinatum</i> ssp. <i>resupinatum</i>                   | <i>T. michelianum</i>                                                           | <i>Vicia sativa</i>                                                                         | <i>Raphanus sativus</i> var. <i>longipinnatus</i>                                                                                               | <i>R. sativus</i> var. <i>oleiformis</i>                                                                                                                           |
| <i>Trifolium subterraneum</i> ssp. <i>subterraneum</i>         | <i>T. subterraneum</i> ssp. <i>subterraneum</i>                 | <i>Trifolium spumosum</i>                                                       |                                                                                             | <i>R. sativus</i> var. <i>oleiformis</i>                                                                                                        | <i>Sinapsis alba</i>                                                                                                                                               |
| <i>Trifolium subterraneum</i> ssp. <i>yanninicum</i>           | <i>T. subterraneum</i> ssp. <i>yanninicum</i>                   | <i>T. glanduliferum</i>                                                         |                                                                                             | <i>Sinapsis alba</i>                                                                                                                            | <i>T. incarnatum</i>                                                                                                                                               |
|                                                                | <i>Medicago polymorpha</i>                                      | <i>Trifolium resupinatum</i> ssp. <i>resupinatum</i>                            |                                                                                             | <i>Brassica napus</i>                                                                                                                           | <i>T. suaveolens</i>                                                                                                                                               |
|                                                                |                                                                 | <i>Trifolium subterraneum</i> ssp. <i>subterraneum</i>                          |                                                                                             | <i>Brassica carinata</i>                                                                                                                        | <i>V. sativa</i>                                                                                                                                                   |
|                                                                |                                                                 |                                                                                 |                                                                                             | <i>T. incarnatum</i>                                                                                                                            |                                                                                                                                                                    |
|                                                                |                                                                 |                                                                                 |                                                                                             | <i>Trifolium suaveolens</i>                                                                                                                     |                                                                                                                                                                    |

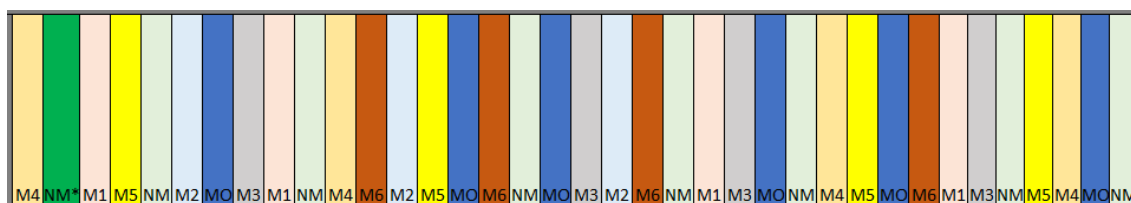


Figura 4 - Esquema representativo da distribuição dos tratamentos nas entrelinhas na parcela em estudo, com M1 (FERTICOVER I LEG AC), M2 (FERTICOVER II LEG AC), M3 (FERTICOVER I LEGRA VERDE), M4 (PROTERRA MAX AC), M5 (PROTERRA TERRA AC), M6 (PROTERRA STRUCTURATOR AC), NM (solo não mobilizado), MO (solo mobilizado bianualmente).

### 3.1. Recolha de amostras de solo para determinação de indicadores físico-químicos e biológicos

As amostras de solo foram recolhidas em duas campanhas de amostragem, a primeira no outono, dia 12 de novembro de 2024, e a segunda na primavera, a dia 23 de abril de 2025. Para análise de indicadores de saúde do solo foram recolhidas amostras compostas, a uma profundidade aproximada de 10 cm, constituídas por 10 sub-amostras obtidas ao longo de cada entrelinha e misturadas num balde para obtenção de uma amostra composta homogênea, e em seguida divididas em sacos para os diferentes parâmetros a determinar, resultando num total de 37 amostras compostas (Figura 5).

Na primeira campanha de amostragem, foram separadas sub-amostras de solo de cada amostra composta para a determinação de parâmetros físico-químicos (humidade, percentagem de matéria orgânica, pH, condutividade, capacidade máxima de retenção de água, textura, carbono, metais e nutrientes). As amostras foram colocadas em sacos plásticos e transportadas para o laboratório para processamento.

Na segunda campanha de amostragem, foram recolhidas amostras de solo compostas, seguindo a metodologia acima descrita. Das amostras compostas separaram-se sub-amostras para análise de parâmetros físico-químicos (humidade, pH, condutividade, carbono e nutrientes) e para determinação da respiração basal do solo. Paralelamente recolheram-se sub-amostras em tubos Falcon de 50 mL para a realização do ensaio de Biolog™.

As amostradas destinadas à determinação de parâmetros físico-químicos foram mantidas nos sacos a temperatura ambiente, enquanto as amostras destinadas à análise da respiração basal e para o ensaio Biolog™, foram, respetivamente, guardadas a 4°C e a -20°C.

A densidade aparente do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, adaptado da norma ISO 11272, que consiste em recolher uma amostra de solo, sem afetar a sua estrutura, utilizando um cilindro de aço de volume conhecido ( $123\text{cm}^3$ ), com uma das bordas biseladas para facilitar a penetração. O cilindro foi introduzido no solo com o auxílio de uma marreta de borracha e um bloco de madeira, até a sua borda ficar nivelada com a superfície. Em seguida, o cilindro foi retirado com o auxílio de uma pá, de forma a evitar perdas. As amostras para medição da densidade aparente foram recolhidas em 5 pontos diferentes ao longo de cada entrelinha. A amostra contida no cilindro foi posteriormente transferida para um saco plástico e transportada para o laboratório.



Figura 5 - O quadrado vermelho delimita a parcela experimental onde foram implementadas as culturas de cobertura, a amarelo estão delimitadas as entrelinhas da vinha, os círculos azuis correspondem à localização aproximada dos pontos de recolha de amostras.

## 3.2. Pré-tratamento das amostras

As amostras recolhidas para a determinação de parâmetros físico-químicos foram secas ao ar, com exceção das amostradas destinadas a determinar a humidade do solo que foram processadas húmidas após chegada ao laboratório. As amostras foram todas crivadas e a fração < 2 mm reservada para as análises. Adicionalmente, para a análise de carbono e metais as amostras foram posteriormente moídas (Moinho Misturador MM 400 da Retsch™). O solo recolhido para a determinação da respiração basal do solo foi crivado húmido (2 mm) e colocado no frigorífico, enquanto o solo para a realização do ensaio de Biolog™ foi imediatamente congelado, após a amostragem.

## 3.3. Determinação de indicadores físico-químicos

### 3.3.1. Determinação do pH do solo

A determinação de pH seguiu a metodologia descrita pela norma ISO10390 (ISO - International Organization for Standardization, 2021), pelo que para a medição do pH em água foram medidos 7,5 mL de solo seco crivado (< 2 mm) para tubos de centrifuga de 50 mL e em seguida adicionados 37,5 mL de água destilada. Para a medição do pH em KCl foram medidos 5 mL de solo seco crivado (< 2 mm) para tubos de centrifuga de 50 mL e em seguida adicionados 25 mL de uma solução de KCl (1M). As suspensões foram agitadas durante  $60 \pm 10$  min (125 rpm) e posteriormente deixadas a repousar por cerca de 1 h. O pH das suspensões foi medido à temperatura ambiente usando o medidor multiparamétrico Edge da Hanna Instruments™, previamente calibrado com os tampões apropriados (pH 4 e pH 7), após homogeneização da amostra. Para cada amostra preparam-se 3 réplicas analíticas.

### 3.3.2. Determinação da condutividade elétrica do solo

A determinação da condutividade elétrica seguiu a metodologia descrita pelo protocolo GLOSOLAN-SOP-07 (Global Soil Laboratory Network & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021). Para o efeito foram medidos 7,5 mL de solo seco crivado (2 mm) para tubos de centrifuga de 50 mL aos quais foram adicionados 37,5 mL de água destilada. A suspensão de solo foi agitada durante  $60 \pm 10$  min (125 rpm) e posteriormente foi deixada a repousar 30 minutos. A condutividade elétrica da

suspensão foi medida à temperatura ambiente utilizando o medidor multiparamétrico Edge da Hanna Instruments<sup>TM</sup>. Para cada amostra preparam-se 3 réplicas analíticas.

### 3.3.3. Determinação do teor de matéria orgânica (MO) do solo por perda por ignição

Este procedimento analítico seguiu a metodologia descrita pela norma EN 15935:2021 para determinação do teor de matéria orgânica do solo. O procedimento iniciou-se pela utilização de cadinhos de porcelana, devidamente identificados, que foram colocados na mufla (Controller B510 da Nabertherm) a 550°C durante 20 min, e de seguida colocados no exsicador para arrefecer e posteriormente pesados ( $M_{cad}$ ). Seguidamente, nos cadinhos colocou-se um mínimo de 5 g de solo seco ao ar, previamente crivado (< 2 mm). Os cadinhos foram colocados na estufa (Incubadora Memmert I) a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , por 24h. Após este período, os cadinhos foram colocados no exsicador (cerca de 1 hora). O procedimento foi repetido até se obter uma massa constante.

Em seguida os cadinhos foram colocados na mufla durante 2 horas a 550°C, e após este período deixados a arrefecer na mufla até aproximadamente 200°C. Em seguida estes foram transferidos para o exsicador até atingirem a temperatura ambiente. Os cadinhos foram, posteriormente, pesados.

A  $MS_{seco}$  e a  $MS_{ign}$  foram calculadas subtraindo a  $M_{cad}$  e a percentagem de matéria orgânica no solo (MO %) foi calculada de acordo com a Equação 1. Foram preparadas 8 réplicas analíticas aleatórias, mas de modo a incluir pelo menos 1 réplica para cada tratamento.

$$MO (\%) = \frac{MS_{seco} - MS_{ign}}{MS_{seco}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

### 3.3.4. Fósforo disponível

A determinação do teor de fósforo disponível foi feita por espectrometria, após extração com uma solução de Mehlich 3 (Bhatta et al., 2021). A escolha deste método teve como base o facto de ser o método adequado a vários tipos de solo (Bhatta et al., 2021). A solução de Mehlich 3 foi preparada adicionando 20 g de nitrato de amónio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) em 800 mL de água destilada, deixando a agitar por 20 minutos. Em seguida, adicionou-se 0,556 g de fluoreto de amónio ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) à solução que foi deixada a agitar por mais 1h, e depois 0,292 g de EDTA, com agitação durante a noite. Posteriormente, foram

adicionados 11,5 mL de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) e 0,82 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), pela ordem descrita. Após a adição de todos os reagentes, a solução foi transferida para um balão volumétrico, o seu volume aferido com água destilada a 1 litro, e deixada a agitar durante 1h. Após ajuste do pH a  $2,5 \pm 0,1$ , a solução final foi armazenada num frasco de plástico. Foram pesadas 2 g de solo, para um tudo de centrífuga, e adicionados 20 mL de Mehlich 3. Após agitação a 200 rpm durante 5 min as amostras foram filtradas para novos tubos. A determinação de P foi realizada utilizando o método colorimétrico (Zhang et al., 2009). Para tal, preparou-se um reagente de coloração contendo molibdato de amónio ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), tartarato de antimónio e potássio ( $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado 5.76N e de ácido ascórbico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ). Foi também preparada uma solução padrão de fósforo (100 mg/L de P), com  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , e a partir desta, 8 padrões de fósforo (12, 9, 6, 4, 2, 1, 0.5 e 0 mg/L). De seguida, foram transferidos 0,5 mL de cada amostra ou, padrão, para tubos de 15 mL, e adicionou-se 6 mL de água desionizada e 1 mL do reagente de coloração. Por fim, as amostras e os padrões foram colocadas no vórtex e após 10 minutos de repouso foram pipetados 200  $\mu\text{L}$  de amostra para cada poço de uma microplaca. A leitura foi feita a 882 nm, num espectrofotómetro de microplaca (Thermo Scientific™ Multiskan Sky).

### 3.3.5. Carbono Orgânico Total (COT)

O teor de Carbono Total (CT) foi determinado por oxidação catalítica a  $950^\circ\text{C}$  e deteção de  $\text{CO}_2$  com detetor de infravermelhos, utilizando o EnviroTOC™ (Elementar Analysensysteme GmbH), em conformidade com as normas oficiais ISO 10694 (ISO - International Organization for Standardization, 1995). Para tal, pesaram-se cerca de 15 a 20 mg de amostra previamente moída. A determinação do Carbono Inorgânico Total (CIT) nas amostras de solo foi também realizada recorrendo ao equipamento para análise de CT. Para tal, cerca de 70 mg de amostra foram digeridas a  $50^\circ\text{C}$  no módulo solITIC, após adição de HCl (3,3%). O  $\text{CO}_2$  libertado foi então analisado no detetor de infravermelhos. O valor de Carbono Orgânico Total (COT) foi obtido por dedução do CIT ao CT.

Para avaliar a exatidão e a precisão dos métodos analíticos, foram incluídas réplicas, brancos de procedimento e materiais de referência certificados em cada lote de amostras analisadas. A análise de réplicas analíticas do solo apresentou uma incerteza  $< 10\%$  e os resultados da análise dos brancos estiveram sempre abaixo do limite de deteção. As recuperações de materiais de referência (B2152 e B2381 para TC

e TIC, respetivamente, ambos providenciados pela Elemental Microanalysis) estiveram dentro do valor certificado.

### 3.3.6. Determinação de elementos potencialmente tóxicos (EPTs)

A concentração pseudo-total de EPTs foi determinada por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) (Agilent 7700) após extração num bloco de aquecimento (DigiPREP MS, SCP Science), com uma mistura de HNO<sub>3</sub>:HCl (3v:1v), seguindo o método 3051A da USEPA (Environmental Protection Agency, 2007). Os extratos foram analisados para 36 EPTs. Para avaliar a exatidão e a precisão do método analítico foram analisadas réplicas, brancos de procedimento e um material de referência certificado. A análise de réplicas analíticas do solo apresentou uma incerteza < 10% e os resultados da análise dos brancos estiveram sempre abaixo do limite de deteção. A recuperação do material de referência Till 1 estava dentro do valor certificado.

### 3.3.7. Humidade/teor total de água do solo

Este parâmetro foi medido de acordo com o método descrito por SPAC (2000), tendo sido utilizados cadinhos de porcelana ou alumínio previamente pesados ( $M_{cad}$ ). Posteriormente, foi colocado em cada cadinho um mínimo de 10 g de solo húmido ( $MS_{hum}$ ), previamente crivado (crivo de 2 mm), os quais foram em seguida pesados. Para cada amostra foram preparadas 2 réplicas analíticas. Os cadinhos foram depois colocados na estufa (Incubadora Memmert I) a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , por 24h. Após este período, os cadinhos foram deixados no exsiccador até arrefecer (cerca de 1 hora) e posteriormente pesados. A massa de solo seco ( $MS_{seco}$ ) foi calculada subtraindo a massa dos cadinhos e a percentagem de humidade/teor de água no solo (Humidade %) foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$Humidade (\%) = \frac{MS_{hum} - MS_{seco}}{MS_{hum}} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

### 3.3.8. Densidade Aparente (Da) do Solo

As amostras recolhidas para a determinação da densidade aparente foram secas numa estufa (Incubadora Memmert I) a  $105^\circ\text{C}$  até se atingir peso constante. Após a secagem, determinou-se a massa de solo seco recolhida em cada cilindro, e densidade aparente

foi calculada como a razão entre essa massa ( $MS_{seco}$ ) e o volume interno do cilindro ( $v$ ), calculado ( $\pi r^2 a$ ), segundo a Equação 3:

$$Densidade\ aparente\ (Da, g/cm^3) = \frac{MS_{seco}}{v} \quad (\text{Equação 3})$$

### 3.3.9. Capacidade máxima de retenção de água (CRA<sub>max</sub>) no solo

Este método seguiu a norma ISO11268-2 (ISO - International Organization for Standardization, 2023). Para tal, foram utilizados tubos de centrifuga de 50 mL cortados, sendo a parte inferior substituída por papel de filtro fixado às paredes do tubo com fita adesiva de papel. O frasco foi fechado com a tampa e posteriormente pesado ( $M_{fr}$ ). De seguida, foram colocados 7 cm de amostra de solo seco crivado (< 2 mm) nos tubos. Os tubos foram submergidos em água, com a tampa virada para cima (nível da água acima do nível de solo), e mantidos assim durante 3 horas. Após este período, os tubos foram retirados da água e colocados na mesma posição, com papel de filtro na base dos mesmos, num tabuleiro com cerca de 7 cm de altura de areia fina, de forma a drenar a água. Após 2 horas, os tubos de solo saturado foram pesados e em seguida colocados na estufa, até obter massa constante (após 48h), a  $105 \pm 5^\circ C$ . No final os tubos foram retirados da estufa e colocados no exsiccador para arrefecer (aproximadamente 1 hora) e posteriormente pesados. Foram preparadas 8 réplicas analíticas aleatórias, mas de modo a incluir pelo menos 1 réplica para cada tratamento. As  $MS_{sat}$  e  $MS_{seco}$  foram calculadas subtraindo  $M_{fr}$ , e a capacidade máxima de retenção de água (CRA<sub>max</sub> %), expressa em percentagem de massa seca foi calculada de acordo com a Equação 4.

$$CRA_{max} (\%) = \frac{MS_{sat} - MS_{seco}}{MS_{seco}} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

## 3.4. Indicadores biológicos de saúde do solo

### 3.4.1. Respiração basal do solo

A respiração microbiana do solo foi medida seguindo uma metodologia adaptada da norma ISO 16072:2002 (ISO - International Organization for Standardization, 2002), utilizando o sistema respirométrico OxiTop®-IDS. O solo fresco (100 g) foi incubado em frascos de vidro herméticos, a  $4^\circ C$ , contendo pastilhas de NaOH para absorver o  $CO_2$  produzido. A diminuição da pressão foi registada ao longo de 6 dias e convertida em taxas de consumo de oxigénio por kg de solo seco. Os resultados foram posteriormente

expressos em  $\text{mg O}_2 \text{ kg}^{-1}$  de solo seco. De forma a comparar tratamentos efetuados em termos de gestão do solo, o valor obtido para a respiração basal do solo em  $\text{mg O}_2 / \text{kg}$  de solo seco, no último dia de ensaio, foi dividido por 32 para converter mg em mmol e depois dividido por  $(24 \times 6 \text{ h})$  para obter o valor de oxigénio em  $\text{mmol O}_2 / \text{kg de solo / h}$ , e assim chegar à taxa de consumo de oxigénio (TCO) (do inglês, oxygen uptake ratio OUR).

### 3.4.2. Determinação da biodiversidade funcional da comunidade microbiana (ensaio de BIOLOG™)

Este ensaio tem como objetivo determinar o perfil funcional da comunidade microbiana de um solo, utilizando Biolog Ecoplates (Biolog System Inc., Hayward, CA, EUA) contendo diversas fontes de carbono (96 poços: 31 fontes de carbono e 1 branco em triplicado).

Quando a comunidade microbiana metaboliza as fontes de carbono à disposição, existe transferência de eletrões para o corante (cloreto de tetrazólio violeta), que altera de cor. Assim a variação de cor é uma medida da utilização das fontes de carbono (Garland, 1997).

As amostras foram processadas de acordo com o as instruções do fabricante (Schmidt, 2020). Para a realização do ensaio começou-se por adicionar 45 ml de  $\text{H}_2\text{Oup}$  a 5g de solo, em condições estéreis. Em seguida a mistura foi incubada a  $25^\circ\text{C}$  a 180-200 rpm por 30 minutos e posteriormente foi deixada repousar por 30 minutos a  $4^\circ\text{C}$ . Após o repouso a suspensão de solo foi filtrada com um filtro de células para um novo tubo de 50 mL. Foi feita uma diluição de 1/100 (400  $\mu\text{l}$  em 40 ml de  $\text{H}_2\text{Oup}$  estéril) e em seguida pipetou-se em cada poço de uma Ecoplaca 150  $\mu\text{l}$  da suspensão diluída. A absorvância foi então medida em cada placa a 590 nm ( $t=0$ ), utilizando um espectrofotómetro com leitor de microplacas (Thermo Scientific™ Multiskan Sky). Por fim as Ecoplacas foram revestidas em parafilme e incubadas numa câmara fitoclimática a  $20^\circ\text{C}$ . As leituras de absorvância foram novamente realizadas de 24 em 24 horas durante 4 dias. No final dos 4 dias foram calculados os valores de desenvolvimento médio de cor nos poços (do inglês: average well color development ou AWCD), bem como os valores para os índices de diversidade e uniformidade. O cálculo para a determinação do AWCD foi feito através da Equação 5:

$$AWCD = \sum_{i=1}^n (C_i - R) / n \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$C_i$  é o valor de absorvância medido em cada poço a 590 nm

$R$  é o valor de absorvância médio medido nos poços de controlo (branco com água)

$n$  é o número de total de poços

Neste ensaio, foi também feito o cálculo de índices de diversidade funcional metabólica, de forma a investigar a diversidade das comunidades (Zak, et al., 1994), seguindo a Equação 6 e 7 apresentadas abaixo.

Índice de diversidade de Shannon ( $H'$ ):

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$P_i$  representa a razão entre o valor de absorvância no  $i$ -ésimo (1 a 31) poço e os valores de absorvância total de todos os poços

Índice de uniformidade de Pielou ( $J'$ ):

$$J' = H' / \ln S \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

$S$  representa o número total de fontes de carbono utilizadas (31 fontes de carbono)

### 3.4.3. Levantamento florístico

Para a identificação e caracterização da diversidade da flora herbácea da entrelinha, a recolha de informação teve por base os diferentes tratamentos. Em cada entrelinha, foi aplicado um quadrado de 1 m<sup>2</sup> (1 m × 1 m) em dois pontos. Em cada ponto, e usando como referência o quadrado, registaram-se a cobertura total (%) e a cobertura (%) por cada espécie herbácea identificada. A identificação das espécies foi realizada no local com o apoio de um guia fotográfico elaborado por Rosa Pinho e Lísia Lopes (Universidade de Aveiro), contendo fotografias e identificação das espécies tipicamente presentes em enrelvamentos espontâneos e semeados em vinha, da aplicação PI@ntNet (versão Android) (PI@ntNet, 2025) e da Flora de Portugal Interativa

(Sociedade Portuguesa de Botânica, 2025). Com base nos dados de cobertura, foram calculados indicadores de diversidade para cada tratamento, incluindo a riqueza específica, o índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ) (Equação 8) e o índice de Simpson ( $D$ ) (Equação 9), em que  $p_i$  corresponde à proporção da cobertura de cada espécie em relação à cobertura total:

$$H' = -\sum p_i \ln p_i \quad (\text{Equação 8})$$

$$D = \frac{1}{\sum p_i^2} \quad (\text{Equação 9})$$

Estes índices permitiram avaliar a diversidade e a dominância da vegetação nos diferentes tratamentos.

### 3.5. Testes estatísticos

Para identificar diferenças significativas entre tratamentos, para os parâmetros que foram determinados em apenas uma das campanhas, foi feito o teste estatístico One Way ANOVA seguido de um teste de comparações múltiplas para identificação das diferenças entre tratamentos. Para os restantes parâmetros, determinados em ambas as campanhas de amostragem, foi utilizado o teste Two Way ANOVA com múltiplas comparações (diferenças entre tratamentos e campanhas).

Os diferentes valores de  $p$  (Tabela 3 do Anexo) indicam o nível de significância estatística nas comparações múltiplas feitas após a ANOVA.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Impacto dos diferentes modos de gestão do coberto vegetal nos parâmetros físico-químicos do solo

Os resultados dos indicadores físico-químicos analisados nas duas campanhas de amostragem (pH, condutividade elétrica, carbono orgânico, fósforo disponível) e, ainda da humidade do solo são apresentados nas Figuras 6, 7 e 9, Figuras 10-11 e nas Tabelas 1 e 2 do Anexo. A matéria orgânica, capacidade máxima de retenção da água e concentração de elementos potencialmente tóxicos foram determinados apenas no

outono (Figuras 8, 12 e Tabela 2, bem como Tabela 1 do Anexo), e a densidade aparente apenas na Primavera (Figura 13 e Tabela 2 do Anexo).

No que diz respeito à amostragem de outono não se observaram diferenças significativas para os elementos potencialmente tóxicos (PTEs), o pH (em H<sub>2</sub>O e KCl), a matéria orgânica (%MO), o carbono orgânico (CO), a humidade e a capacidade máxima de retenção da água (WHC), entre os diferentes tratamentos. Contudo, observaram-se diferenças significativas para a condutividade elétrica (CE) e o fósforo disponível (P). No que diz respeito à CE, os valores foram significativamente mais elevados para o tratamento M4 (Figura 7), composto por uma mistura de plantas anuais leguminosas, em relação a todos os restantes tratamentos. No entanto, a elevada variabilidade dos dados, apresentada no tratamento M4 sugere heterogeneidade entre réplicas. No caso do P disponível, observou-se um valor significativamente mais elevado em M4 comparativamente a M3 (Figura 10), composto por uma mistura de plantas (leguminosas e gramíneas) de longa duração, e ao solo não mobilizado (NM).

Na primavera, não se observaram diferenças significativas para o pH em KCl, CE, CO, P, humidade e densidade aparente. No entanto, o pH em H<sub>2</sub>O apresentou diferenças significativas entre tratamentos (Figura 6). O tratamento MO foi aquele que se destacou e apresentou um pH mais elevado, e significativamente diferente de todos os outros tratamentos, contudo não se pode considerar que estas diferenças possam ter um grande significado, uma vez que estamos a falar de uma gama de variação entre 5,62 (para M2) e 6,32 (para MO).

Entre os indicadores analisados nas duas campanhas de amostragem observaram-se diferenças significativas entre os dois períodos, para um ou mais tratamentos, no caso do pH em H<sub>2</sub>O, EC, CO.

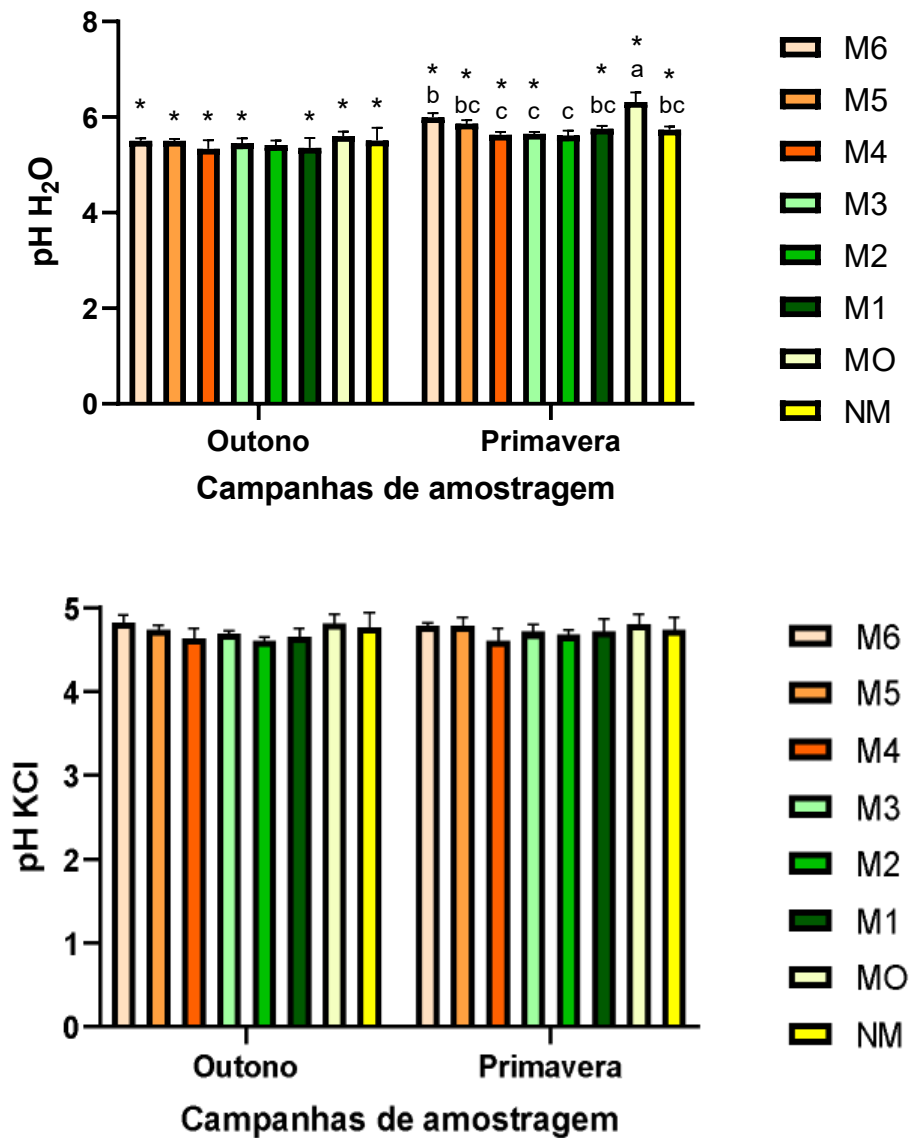


Figura 6 - Valores médios de pH em H<sub>2</sub>O (a) e KCl (b) e respetivos desvios padrão para cada tratamento, nas duas campanhas de amostragem. As diferenças significativas entre tratamentos, para a mesma campanha de amostragem, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras diferentes acima das barras. As diferenças significativas entre campanhas de amostragem, para cada tratamento, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com \* acima das barras.

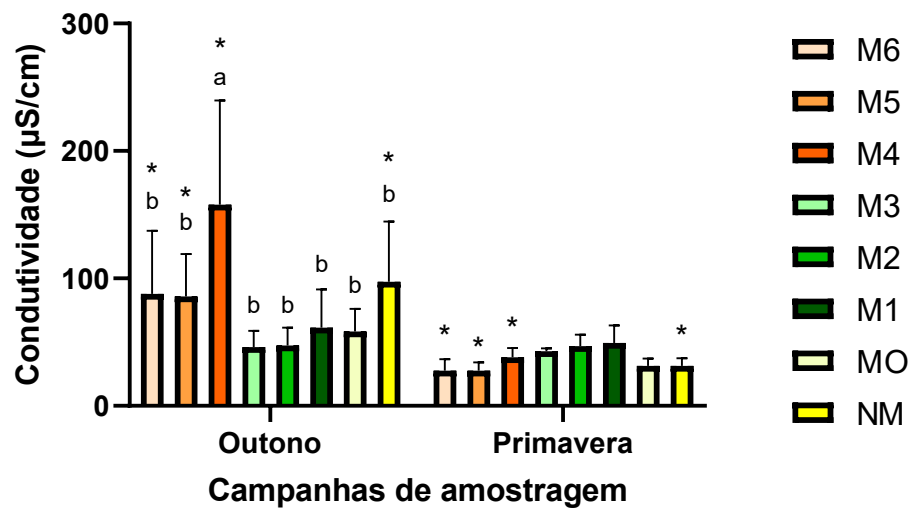


Figura 7 - Valores médios de condutividade em  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e respetivos desvios padrão para cada tratamento, nas duas campanhas de amostragem. As diferenças significativas entre tratamentos, para a mesma campanha de amostragem, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras diferentes acima das barras. As diferenças significativas entre campanhas de amostragem, para cada tratamento, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com \* acima das barras.

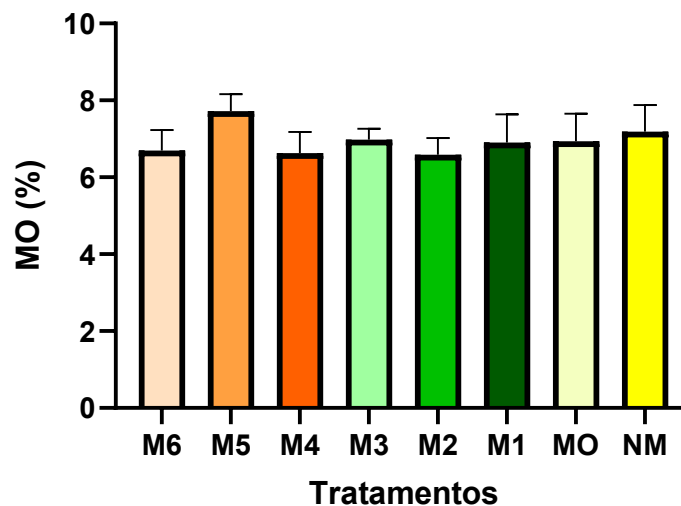


Figura 8 - Valores médios da matéria orgânica em percentagem e respetivos desvios padrão para cada tratamento. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ).

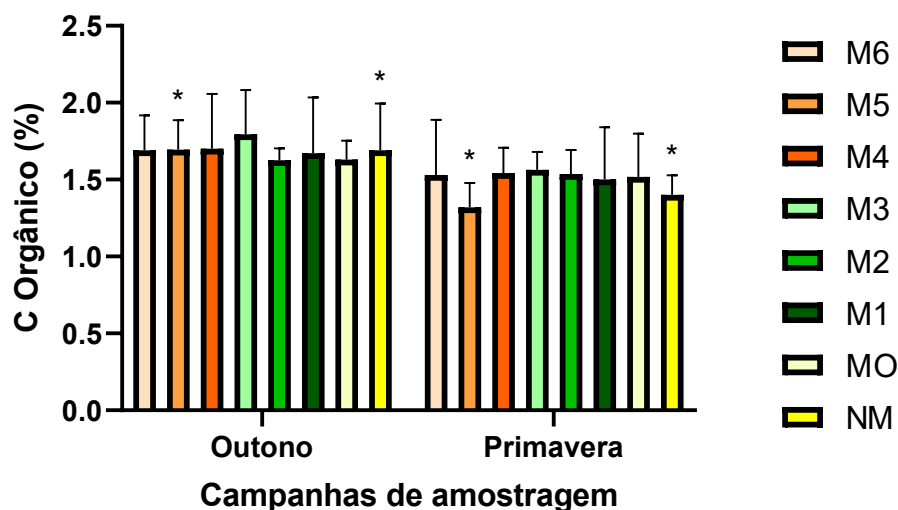


Figura 9 - Valores médios de carbono orgânico em percentagem e respetivos desvios padrão para cada tratamento, nas duas campanhas de amostragem. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ). As diferenças significativas entre campanhas de amostragem, para cada tratamento, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com \* acima das barras.

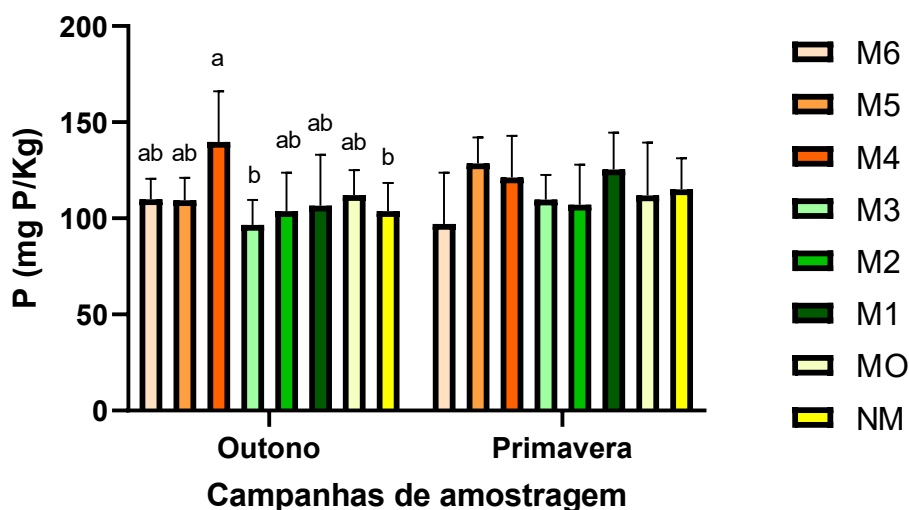


Figura 10 - Valores médios de fósforo em mg P/Kg e respetivos desvios padrão para cada tratamento, nas duas campanhas de amostragem. As diferenças significativas entre tratamentos, para a mesma campanha de amostragem, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras diferentes acima das barras. As diferenças significativas entre campanhas de amostragem, para cada tratamento, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com \* acima das barras.

Os valores de pH observados (entre 5,5 e 6,0) enquadram-se no intervalo característico de solos de vinha (Keller M., 2010; Michigan State University, 2013). Solos com  $\text{pH} < 5,5$  são geralmente considerados fortemente ácidos, o que pode limitar a disponibilidade de nutrientes como Ca, Mg e P e aumentar a toxicidade do  $\text{Al}^{3+}$ . Por outro lado, o intervalo 5,5 a 6,5 é considerado moderadamente ácido, ideal para a maioria das culturas de videira, promovendo o equilíbrio nutricional (Calouro Autores et al., 2022; Michigan State University, 2013; USDA, 2014b).

O pH em  $\text{H}_2\text{O}$  reflete a acidez ativa, mais variável com a humidade e os sais presentes no solo. Os resultados dos ensaios demonstraram que o pH do solo, com exceção do tratamento M2, aumentou significativamente da campanha de outono para a da primavera (Figura 6a). Estes resultados indicam um comportamento de variação sazonal do pH já observado num estudo em solos agrícolas, por Conyers, M. K., et al. nas encostas do sudoeste de New South Wales, que tende a apresentar valores de pH ligeiramente superiores na primavera (Conyers et al., 1997). No entanto, ao analisar isoladamente os tratamentos na primavera, verificou-se também, que todos os tratamentos apresentaram pH ligeiramente inferior ao tratamento com mobilização do solo (MO), com diferenças significativas. Um estudo (Zhao et al., 2022) demonstrou que a não mobilização do solo conduz a uma diminuição do pH devido à acumulação de resíduos vegetais na superfície, característica típica de sistemas em que o solo não é revolvido. Segundo os autores, estes resíduos acumulados sofrem decomposição preferencial na camada superficial, processo através do qual são libertados ácidos orgânicos capazes de acidificar o solo. Esta dinâmica explica por que razão os valores de pH tendem a ser mais baixos em sistemas de não mobilização. Em contraste, quando o solo é mobilizado, os resíduos são incorporados e misturados no perfil do solo, reduzindo a concentração superficial de matéria orgânica em decomposição e, consequentemente, a produção localizada de ácidos orgânicos. Assim, o pH tende a ser mais elevado em sistemas mobilizados. Os resultados obtidos sugerem, portanto, que, embora o pH global do solo tenha aumentado da estação de outono para a primavera, o tipo ou percentagem de cobertura instalada, bem como o sistema de mobilização do solo, pode influenciar o pH local devido a processos de mineralização e liberação de ácidos provenientes da decomposição da biomassa pelas culturas de cobertura (Kucerik et al., 2024; Scavo et al., 2022; Zhao et al., 2022).

Os valores de pH KCl obtidos encontram-se numa faixa de 4,6 a 4,9 (Figura 6b), este parâmetro refere-se à acidez da solução do solo mais a acidez de reserva nos colóides. O pH KCl é, portanto, sempre mais ácido que o pH  $\text{H}_2\text{O}$ , como podemos

verificar nos resultados. O pH em água é mais variável porque reflete a acidez ativa do solo, sensível a exsudados de raízes, decomposição de matéria orgânica e atividade biológica, que mudam ao longo do ano. Já o pH em KCl mede a acidez de troca, dependente dos colóides do solo formados por argilas e matéria orgânica, que se altera lentamente, por isso permanece praticamente constante frente a variações sazonais ou de cobertura vegetal, como podemos observar na ausência de diferenças significativas.

A condutividade é visivelmente mais alta no outono do que na primavera (Figura 7) para quatro dos tratamentos, como evidenciado pelas diferenças significativas. Isto pode estar associado com a aplicação de fertilizantes inorgânicos nos tratamentos M4-6 e MO, de acordo com a informação fornecida pela EVAG. No entanto esta diferença pode também estar relacionada com a menor lixiviação no outono (menos precipitação após a aplicação das culturas de cobertura), ou a uma acumulação temporária de sais resultante da mineralização de resíduos vegetais. A mistura M4, apresenta uma condutividade significativamente maior do que todos os outros tratamentos, podendo indicar maior libertação de nutrientes ou sais solúveis pelas espécies utilizadas no tratamento M4.

Por outro lado, na primavera os valores de condutividade são bastante mais baixos, o que poderá estar associado a chuvas e, por sua vez, lixiviação, ou a uma maior absorção de nutrientes pelas culturas de cobertura em desenvolvimento. É importante referir que nos dias anteriores à amostragem feita na primavera, choveu. Os tratamentos M1 e M2 destacaram-se com valores mais altos, mas não significativamente superiores aos restantes. Os tratamentos M1 e M2, uma vez que são misturas constituídas exclusivamente por leguminosas de longa duração, podem conter, portanto, espécies com maior capacidade de mobilizar nutrientes ao longo do tempo, no entanto, sabe-se também que a condutividade é influenciada pela combinação de outras propriedades físico-químicas incluindo, o tipo e quantidade de argilas, a humidade, a densidade aparente, a matéria orgânica e a temperatura, uma vez que estes fatores controlam a quantidade e mobilidade de iões na solução do solo, bem como a porosidade e a quantidade de água, determinando assim a maior ou menor capacidade do solo para conduzir corrente elétrica. (Corwin & Lesch, 2005).

A condutividade elétrica do solo apresentou valores entre 20 a 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Podendo concluir que todos os valores de condutividade se encontram bem abaixo do limiar de salinidade problemática para solos, em ambas as estações (Figura 7) que se encontra acima de 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Calouro Autores et al., 2022; USDA, 2014a). Segundo a literatura técnica os resultados são indicativos de solos sem acumulação de sais

solúveis, sugerindo, portanto, um solo com boa drenagem (Calouro Autores et al., 2022; USDA, 2014a).

Os valores de matéria orgânica obtidos estão entre 6,5% e 7,7% (Figura 8), não existindo diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. Com estes resultados podemos observar um solo com teores elevados de matéria orgânica. Valores de matéria orgânica acima de 6% são considerados muito altos para solos agrícolas (Calouro Autores et al., 2022), para solos de vinha, valores entre 2 a 4% já são produtivos, e valores superiores a 5% podem indicar bom aporte orgânico (Michigan State University, 2013). O principal componente da matéria orgânica é o carbono orgânico, estando estes dois parâmetros extremamente relacionados. Inclusivamente, e assumindo, que a matéria orgânica possui cerca de 50% de carbono orgânico (Matsuda et al., 2018), pode ser utilizado um fator de 1,724 para determinar a percentagem de matéria orgânica a partir da percentagem de carbono orgânico no solo. Assumindo valores de carbono orgânico médios de 1,5% (Figura 9), a matéria orgânica esperada a partir da percentagem de carbono orgânico seria de aproximadamente 2,6%. Tendo a determinação da matéria orgânica, neste trabalho, sido realizada por perda de peso por ignição, podemos verificar que os resultados para ambos os métodos apresentam uma discrepância grande. A perda de massa inorgânica durante a ignição, como por exemplo a perda de água de minerais hidratados, e/ou a desidratação de argilas, causa uma perda de peso que é atribuída erradamente á matéria orgânica. Por este motivo podemos, portanto, estar perante um valor de matéria orgânica sobrestimado.

No entanto, comparando os valores de %MO estimados a partir CO com a literatura técnica, estes solos são igualmente considerados produtivos (Calouro Autores et al., 2022; Michigan State University, 2013). Segundo o Manual de Fertilização das Culturas, do INIAV, os valores obtidos estão, em geral, abaixo do limiar crítico de 2% pode representar potencial risco de degradação estrutural (Calouro Autores et al., 2022), no entanto com os valores apresentados pelos solos dos diferentes tratamentos, este risco de degradação estrutural não é esperado.

Todos os valores de condutividade observados permaneceram muito abaixo do limiar de risco de salinidade, indicando, portanto, que a matéria orgânica está a nutrir o solo sem provocar salinização. A matéria orgânica tende, também, a estabilizar o pH, evitando oscilações extremas, mantendo o pH ideal para a cultura. Nos resultados obtidos, os valores de pH estavam dentro de um intervalo adequado, para a vinha, e

sem grandes variações entre tratamentos, o que se pode ser atribuído em parte à presença estável de matéria orgânica.

De um modo geral nenhum tratamento teve impacto no teor de matéria orgânica ou carbono orgânico dentro de cada estação, sendo que não existem diferenças significativas em nenhum dos casos. Por esta razão é possível assumir que nenhum tipo de cobertura (sementeiras ou espontâneo/ mobilização ou não mobilização) teve impacto significativo no teor de carbono orgânico, a curto prazo. No entanto, o teor de carbono orgânico no solo, foi significativamente superior no outono em comparação com a primavera (Figura 9) para os tratamentos M5, composto por uma mistura de plantas (leguminosas, gramíneas e crucíferas) anuais e NM. Os resultados sugerem alguma perda de carbono entre campanhas, o que pode resultar de uma maior mineralização na primavera, resultante das temperaturas mais elevadas registadas nesse período.

Estes resultados sugerem que a variação interanual (outono vs primavera) poderá ter tido mais peso do que os próprios tratamentos no estado atual do solo. A melhor retenção de carbono no outono indica uma janela temporal mais favorável para a acumulação de matéria orgânica, especialmente em sistemas com cobertura vegetal. No entanto, mesmo que os tratamentos não tenham gerado diferenças estatísticas nesta fase, espera-se que a presença de cobertura (sementeiras ou espontânea) previna perdas por erosão e lixiviação, e a longo prazo, se possa vir a demonstrar diferenças cumulativas no sequestro de carbono e qualidade do solo, o qual, contudo já sugere ser um solo de qualidade.

O método utilizado para a determinação do fósforo no solo, foi a extração de fósforo pela solução de Mehlich 3. Este método mede o fósforo disponível (P disponível ou assimilável pelas plantas), baseando-se numa solução química que simula o que as raízes das plantas conseguem extrair e absorver, sendo particularmente eficaz em solos ácidos a neutros (pH entre 5,5 e 7,0) (Espinoza, 2021; Nair & Sollenberger, 2022; Penn et al., 2018), como os solos amostrados. Com base em diversas referências (Espinoza, 2021; Iowa State University, 2003; Nair & Sollenberger, 2022; The Ohio State University, n.d.), para solos agrícolas, em que o P foi extraído com o método Mehlich 3, considera-se que um valor inferior a 15 mg/kg corresponde a um baixo teor de fósforo disponível (deficiente para a maioria das culturas).

Com isto podemos concluir que os valores obtidos (Figura 10), de cerca de 100 a 140 mg P/kg são altos. Valores estes que podem ser explicados pela elevada percentagem de matéria orgânica obtida, pois normalmente, mais matéria orgânica, corresponde a maior mineralização, e por consequência mais fósforo orgânico

convertido em formas disponíveis. De acordo com informação fornecida pela EVAG, os solos das modalidades M4-6 e MO, foram fertilizados aquando da segunda sementeira (novembro de 2024). No entanto, os solos de todos os tratamentos também poderão ter sido fertilizados com P aquando das sementeiras. Embora a maioria dos solos contenha fósforo em abundância, este é um dos nutrientes essenciais menos disponíveis para as plantas, pois a maior parte do fósforo é extremamente insolúvel e, por isso, imóvel, devido à sua afinidade por catiões como o  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$ , com os quais forma complexos insolúveis, assim como ao seu aprisionamento na estrutura dos minerais de argila, bem como à sua incorporação na biomassa microbiana (Keller M., 2010). A conversão de fósforo inorgânico em formas orgânicas pela comunidade microbiana ocorre através do processo de imobilização microbiana. Os microrganismos absorvem ortofosfato presente na solução do solo através de sistemas de transporte de alta afinidade e incorporam-no rapidamente na biomassa microbiana. Esta incorporação transforma o P inorgânico em P orgânico, constituindo um reservatório dinâmico que pode representar uma fração significativa do P total do solo (tipicamente 2 a 10%, e até 50% em camadas de manta morta, ou seja à superfície) (Richardson & Simpson, 2011).

As leguminosas (presentes em todas as misturas utilizadas) desempenham um papel central no funcionamento do solo, sobretudo através da fixação biológica de azoto e da capacidade de aumentar a disponibilidade de fósforo. As leguminosas libertam compostos orgânicos e enzimas fosfatases que promovem a solubilização de formas pouco disponíveis de P, aumentando assim a fração de fósforo que fica acessível na solução do solo (Sakib et al., 2025).

No outono foi possível observar valores significativamente superiores para o tratamento M4, composto por uma mistura de plantas anuais leguminosas, em relação a M3, composto por uma mistura de plantas (leguminosas e gramíneas) de longa duração, e NM (Figura 10). Estes resultados podem estar relacionados com a aplicação de fertilizante mas também sugerem que M4 pode ser constituída por espécies com maior capacidade de mobilizar fósforo, bem como estimular uma comunidade microbiana com maior capacidade de mineralização de formas orgânicas de fósforo. M4 é constituída por uma variedade de leguminosas, estando estas possivelmente ligadas aos resultados obtidos (Richardson et al., 2011; Sakib et al., 2025; Vance et al., 2003). Os valores de pH obtidos indicam acidez moderada, o que é relevante para a disponibilidade do fósforo no solo. Em solos ácidos (a baixo de pH 5,5), o fósforo é o principal nutriente limitante (Calouro Autores et al., 2022). O pH, contudo, aqui não terá

sido o fator determinante, porque no solo de M4, não se verificaram diferenças de pH, para uma maior acidez, relativamente ao solo coberto por M3.

Na primavera os valores são, no entanto, mais equilibrados entre tratamentos, sem diferenças significativas. Em relação à comparação entre estações não foi possível observar diferenças significativas entre outono e primavera para nenhum dos tratamentos.

A capacidade máxima de retenção de água de um solo é, por sua vez, praticamente constante ao longo do ano para um determinado solo, porque depende da estrutura física e da composição química do solo, principalmente do teor de matéria orgânica e da sua densidade e textura (Arnold et al., 2014; Matsuda et al., 2018), por esta razão o ensaio foi realizado apenas numa das campanhas, nomeadamente no outono, no entanto como se observou uma diminuição do carbono orgânico disponível na primavera, teria sido relevante a determinação deste parâmetro também na primavera.

Os valores obtidos de retenção máxima de água rondaram os 50%, sem diferenças significativas entre tratamentos (Figura 12), sugerindo que o solo aparenta ter uma boa capacidade de reter água, fornecendo-a às plantas, bem como uma boa porosidade, confirmada através da observação dos resultados para a densidade do solo (Figura 13). Densidades abaixo de aproximadamente  $1,10 \text{ g/cm}^3$ , tal como observado no presente estudo, em geral, são indicados como ideais para crescimento de plantas (USDA - United States Department of Agriculture, 2019), indicando solos não compactados. Podemos, portanto, assumir com os resultados obtidos que estamos perante solos com boa porosidade. Nenhum tratamento (sementeiras ou espontâneo/mobilização ou não mobilização) alterou a curto prazo a densidade aparente, sugerido pela ausência de diferenças significativas entre tratamentos. A mobilização do solo nos tratamentos M4-6 e MO não resultou em diferenças na compactação, possivelmente porque foi pouco intensa e superficial ou porque a drenagem natural e o alto teor de matéria orgânica favoreceram a redistribuição de poros.

Valores baixos de densidade aparente (geralmente abaixo de  $1,3 \text{ kg/dm}^3$ ) (Flodin, 2006) como os obtidos, indicam, geralmente, uma condição de solo poroso, sendo estes resultados coerentes com a elevada capacidade de retenção de água (51 a 57%) e com os bons teores de matéria orgânica (6 a 7%), observados anteriormente. O elevado teor de matéria orgânica ajuda a reduzir a densidade aparente, criando agregados estáveis com boa porosidade. Os solos com boa agregação terão, portanto, geralmente, menor densidade aparente, boa retenção de água e uma mistura de

macroporos e microporos que promove o movimento da água dentro do solo (Matsuda et al., 2018). A baixa condutividade elétrica observada reafirma que os espaços porosos estão preenchidos por água de boa qualidade (poucos sais), sem efeitos osmóticos que poderiam afetar a estrutura do solo.

Adicionalmente, de acordo com o mapa de solos da ESDAC (European Soil Data Centre (ESDAC), 2025), este solo é um Cambissolo Mólico, com textura média (apresentando argila entre 18 % e 35 % quando a areia é superior a 15 %, ou argila inferior a 18 % quando a areia varia entre 15 % e 65 %), correspondendo razoavelmente à noção de solo franco-argiloso. Um solo predominantemente franco é, portanto, um solo intermédio a nível de arejamento, infiltração, capacidade de retenção de água e nutrientes, sendo por isso este tipo de textura a mais indicada e mais comum na plantação de vinhas (Abreu, 2020), propriedades confirmadas com os resultados obtidos para os parâmetros previamente mencionados.

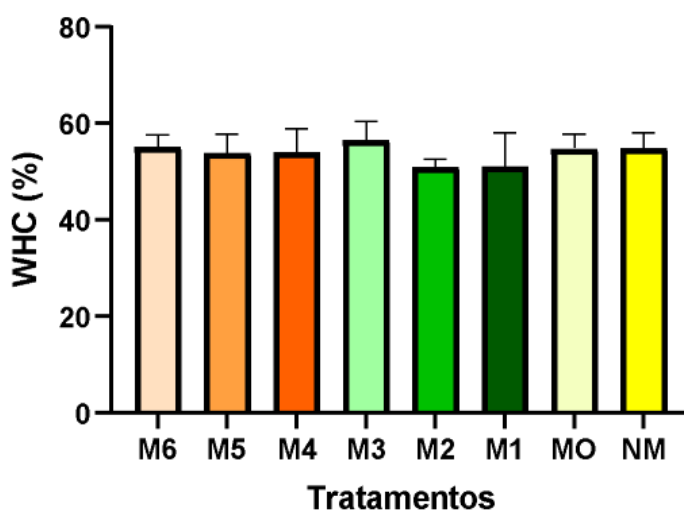


Figura 11 - Valores médios de capacidade máxima de retenção de água do solo em percentagem e respetivos desvios padrão, para cada tratamento. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p>0,05$ ).

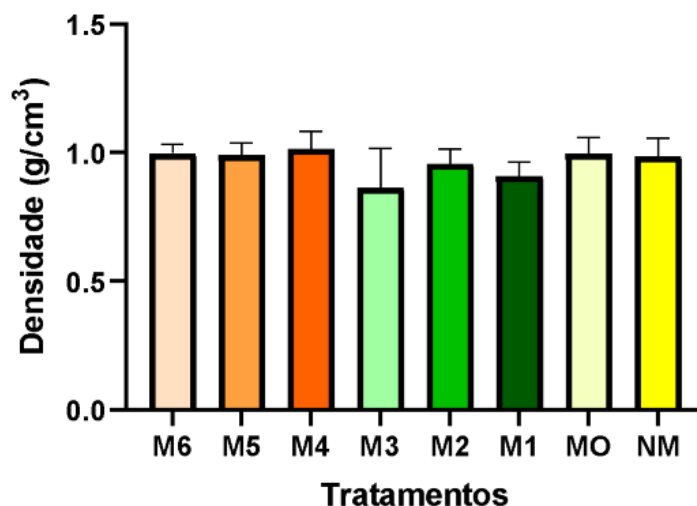


Figura 12 - Valores médios de densidade aparente do solo em g/cm<sup>3</sup> e respetivos desvios padrão, para cada tratamento. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ).

No que diz respeito aos elementos potencialmente tóxicos (PTEs), comparando os resultados obtidos (Tabela 2) com os valores de referência estabelecidos pela APA no Guia Técnico de Solos Contaminados (Agência Portuguesa do Ambiente, 2022), podemos verificar que o solo apresenta níveis normais para a maioria dos metais analisados (Zn, Cu, Pb, Ni, Cr, etc.). No entanto, o arsénio (As) e o tálio (Tl) ultrapassaram os valores de referência aconselhados pela APA. Estes resultados podem estar relacionados com a geologia da área. De acordo com a carta geológica 1:50000 disponibilizada pelo LNEG, nesta zona são predominantes os granitos porfiróides de grão grosseiro ou médio a grosseiro. A possível presença de As em granitos não é resultante da composição essencial destas rochas, mas sim da ocorrência de minerais acessórios que podem concentrar este elemento. Estudos em granitos da Nova Escócia no Canadá (Maciag et al., 2023), mostram que o As presente em águas subterrâneas deriva sobretudo da oxidação de sulfuretos, em particular da pirite, que pode conter teores muito elevados de As (até 15.000 mg/kg). Outros minerais acessórios, como a cordierite, podem também contribuir para a contaminação devido à sua abundância e relativa solubilidade, ainda que em concentrações mais baixas. Minerais como monazite, zircão ou titanite também podem incorporar As, mas de forma menos significativa. Assim, os níveis de As presentes em solos graníticos dependem sobretudo da mineralogia acessória e das condições de alteração hidrogeoquímica, e não da matriz granítica em si.

Tabela 2 - Concentrações pseudo-totais médias (mg/kg) de elementos potencialmente tóxicos, detetadas nos solos das entrelinhas sujeitos a cada um dos tratamentos em estudo, e os respetivos valores de referência para solos pouco profundos e uso agrícola, estabelecidos pela APA (Agência Portuguesa do Ambiente, 2022).

| Contaminante<br>s | Valor de referência para solos pouco profundos: Uso agrícola (APA) (mg/kg) | Valor obtido |          |          |          |          |          |          |          |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                   |                                                                            | (mg/kg)      |          |          |          |          |          |          |          |
|                   |                                                                            | M6           | M5       | M4       | M3       | M2       | M1       | MO       | NM       |
| Li                | --                                                                         | 113.94       | 106.75   | 105.72   | 105.60   | 98.06    | 108.05   | 106.29   | 112.01   |
| Be                | 4                                                                          | <2           | <2       | <2       | <2       | <2       | <2       | <2       | <2       |
| B                 | 120                                                                        | <20          | <20      | <20      | <20      | <20      | <20      | <20      | <20      |
| Na                | --                                                                         | <200         | <200     | <200     | <200     | <200     | <200     | <200     | <200     |
| Mg                | --                                                                         | 7906.92      | 7460.12  | 7487.73  | 7370.54  | 7450.06  | 7278.46  | 7548.07  | 7740.87  |
| Al                | --                                                                         | 45644.19     | 42567.94 | 42485.92 | 41781.59 | 41657.08 | 43653.50 | 43934.77 | 43838.63 |
| P                 | --                                                                         | 1045.20      | 942.78   | 951.62   | 836.44   | 822.53   | 990.08   | 903.20   | 952.60   |
| K                 | --                                                                         | 11915.12     | 11067.67 | 10908.58 | 10785.90 | 10888.85 | 10664.67 | 11031.63 | 11697.03 |
| Ca                | --                                                                         | 951.14       | 906.23   | 825.99   | 740.46   | 798.54   | 771.39   | 892.23   | 961.49   |
| V                 | 86                                                                         | 42.82        | 40.88    | 40.16    | 39.93    | 40.63    | 39.84    | 41.05    | 41.67    |
| Cr                | 160                                                                        | 18.91        | 18.07    | 18.14    | 18.21    | 18.61    | 18.16    | 18.30    | 18.57    |
| Mn                | --                                                                         | 300.68       | 293.13   | 326.56   | 282.72   | 297.30   | 280.61   | 289.92   | 302.48   |
| Fe                | --                                                                         | 29459.72     | 28000.54 | 28733.08 | 27673.81 | 28822.56 | 27525.68 | 28397.38 | 28702.40 |
| Co                | 22                                                                         | 10.26        | 9.74     | 10.01    | 8.95     | 9.71     | 9.19     | 9.53     | 10.41    |
| Ni                | 100                                                                        | 9.27         | 9.13     | 9.48     | 8.82     | 9.06     | 9.05     | 9.26     | 9.27     |
| Cu                | 140                                                                        | 22.73        | 25.29    | 21.25    | 21.97    | 22.60    | 21.74    | 25.10    | 21.57    |
| Zn                | 340                                                                        | 127.13       | 129.58   | 128.48   | 121.96   | 125.64   | 118.88   | 128.03   | 125.85   |
| As                | 11                                                                         | 16.72        | 19.36    | 23.54    | 19.34    | 17.17    | 16.96    | 17.37    | 17.86    |
| Se                | 2.4                                                                        | <2           | <2       | <2       | <2       | <2       | <2       | <2       | <2       |
| Rb                | --                                                                         | 165.47       | 155.22   | 150.70   | 152.18   | 156.28   | 151.57   | 154.35   | 162.67   |
| Sr                | --                                                                         | 12.07        | 12.28    | 12.98    | 11.97    | 13.85    | 10.91    | 12.40    | 13.20    |
| Y                 | --                                                                         | 8.46         | 8.70     | 8.39     | 7.72     | 9.09     | 7.96     | 8.39     | 8.33     |
| Mo                | 6.9                                                                        | 0.67         | 0.25     | 0.36     | 0.34     | 0.27     | 0.41     | 0.35     | 0.42     |
| Ag                | 20                                                                         | <0.1         | <0.1     | <0.1     | <0.1     | <0.1     | <0.1     | <0.1     | <0.1     |
| Cd                | 1                                                                          | <0.2         | <0.2     | <0.2     | <0.2     | <0.2     | <0.2     | <0.2     | <0.2     |
| Sn                | --                                                                         | 5.97         | 5.07     | 5.19     | 4.24     | 5.57     | 5.01     | 5.14     | 5.96     |
| Sb                | 7.5                                                                        | <0.2         | <0.2     | <0.2     | <0.2     | <0.2     | <0.2     | <0.2     | <0.2     |
| Ba                | 390                                                                        | 138.10       | 130.18   | 125.81   | 125.93   | 129.61   | 119.40   | 130.14   | 138.09   |
| La                | --                                                                         | 32.91        | 33.94    | 38.13    | 31.46    | 39.48    | 31.45    | 34.20    | 34.60    |
| Ce                | --                                                                         | 75.49        | 80.04    | 95.72    | 73.98    | 93.52    | 72.66    | 81.12    | 87.95    |
| W                 | --                                                                         | 0.12         | 0.11     | 0.11     | <0.1     | <0.1     | 0.10     | 0.11     | 0.11     |
| Tl                | 1                                                                          | 1.27         | 1.19     | 1.17     | 1.15     | 1.15     | 1.16     | 1.18     | 1.22     |
| Pb                | 45                                                                         | 14.34        | 14.00    | 14.62    | 13.69    | 15.11    | 13.85    | 14.85    | 14.01    |
| Bi                | --                                                                         | <1           | <1       | <1       | <1       | 1.47     | <1       | <1       | <1       |
| Th                | --                                                                         | 16.29        | 17.08    | 18.74    | 15.40    | 19.70    | 15.38    | 17.05    | 17.25    |
| U                 | 23                                                                         | 10.01        | 9.94     | 9.69     | 9.41     | 10.49    | 9.51     | 10.16    | 9.92     |

Adicionalmente, e confirmando o que foi anteriormente dito, um estudo conduzido num plutão de granito no depósito de tungsténio das Minas da Panasqueira (Breiter et al., 2023), verificou que este é constituído maioritariamente por granitos porfíricos de grão médio a grosseiro, leucogranitos e greisens. Nestes, observa-se que o granito porfírico fresco não apresenta concentrações elevadas de As na sua matriz, mas pode conter sulfuretos como pirite e arsenopirite, sobretudo em zonas greisenizadas e nas proximidades de veios hidrotermais. Estes minerais contêm As, potenciando o enriquecimento deste metalóide no local. Por este motivo, para a devida interpretação, destes valores seria importante conhecer os valores do background geológico do local de estudo. Só assim seria possível concluir se estes valores indicam contaminação ou não. Estes dois elementos também poderão ter origem antropogénica (uso de pesticidas, resíduos industriais ou águas de rega contaminadas). É também pertinente referir que estes valores correspondem a concentrações totais, podendo não refletir a fração biodisponível.

## 4.2. Indicadores biológicos

### 4.2.1. Respiração basal do solo

É importante, começar por referir que o ensaio foi realizado por 6 dias e a literatura estipula os valores por 7 dias. Desta forma, espera-se que os nossos resultados estejam ligeiramente subestimados comparativamente aos dados da bibliografia, no entanto não fica comprometida a nossa capacidade de comparar tratamentos efetuados em termos de gestão do solo.

Tabela 3 – Valores médios de respiração basal do solo em mg O<sub>2</sub> /kg de solo seco, no último dia de ensaio, e a sua correspondente conversão para taxa de consumo de oxigénio (TCO) em mmol O<sub>2</sub>/kg de solo /h, para cada tratamento.

|                   | RESPIRAÇÃO<br>BASAL DO SOLO | TCO  |
|-------------------|-----------------------------|------|
| PROTERRA          | M6                          |      |
|                   | 274.80                      | 0.06 |
|                   | M5                          |      |
|                   | 282.65                      | 0.06 |
|                   | M4                          |      |
| FERTICOVER        | 472.56                      | 0.10 |
|                   | M3                          |      |
|                   | 514.49                      | 0.11 |
|                   | M2                          |      |
|                   | 263.21                      | 0.06 |
| MOBILIZADO        | M1                          |      |
|                   | 337.88                      | 0.07 |
| NÃO<br>MOBILIZADO | MO                          |      |
|                   | 222.30                      | 0.05 |
|                   | NM                          |      |
|                   | 286.40                      | 0.06 |

Os valores obtidos, correspondem a uma %MO estável no solo, que vai sendo mineralizada progressivamente e por isso tem capacidade de fornecer nutrientes de forma progressiva, sendo, contudo, evidente que algumas misturas foram capazes de promover um ligeiro aumento da taxa de consumo de oxigénio (M3 e M4).

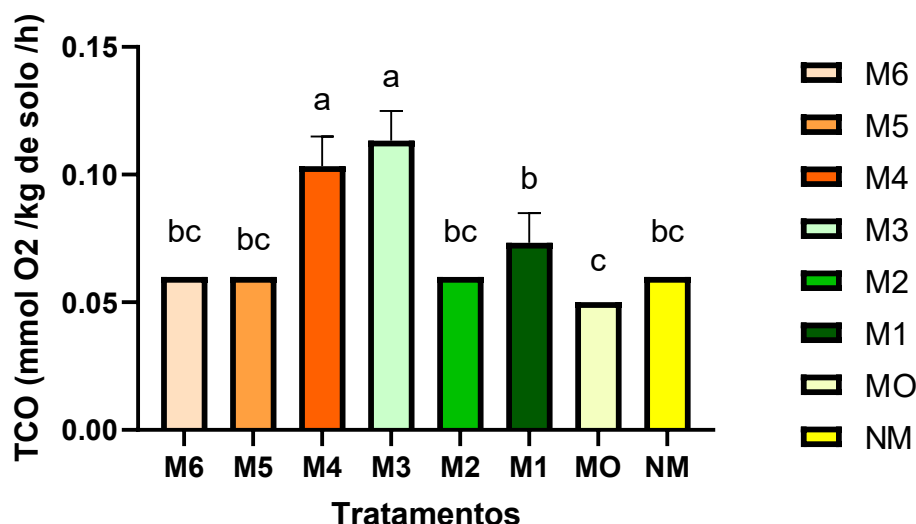


Figura 13 – Taxa de consumo de oxigénio (TCO) em mmol O<sub>2</sub>/kg de solo /h e respetivos desvios padrão, para cada tratamento. As diferenças significativas entre tratamentos, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras diferentes acima das barras.

Comparando os tratamentos entre si, ao fim de 6 dias de ensaio (Figura 13), os tratamentos M3 e M4 apresentaram os valores mais elevados de TCO, formando um grupo estatisticamente distinto dos restantes (grupo a). Este resultado indica que ambos os tratamentos proporcionaram condições mais favoráveis ao desenvolvimento da comunidade microbiana. No caso de M3, composto por uma mistura de leguminosas e gramíneas de longa duração, a elevada atividade microbiana poderá estar relacionada com a estabilidade estrutural conferida pelas espécies que o compõem, como por exemplo maior densidade radicular, promovendo maior arejamento do solo e maior aporte contínuo de exsudados, que sustentam um ambiente biológico ativo. Já o tratamento M4, embora constituído por uma cultura anual de leguminosas, evidenciou igualmente um aumento significativo da respiração microbiana. Este comportamento poderá dever-se à rápida produção de biomassa e à qualidade do material vegetal envolvido, que pode disponibilizar azoto facilmente assimilável nas fases iniciais de crescimento. Os tratamentos M1, M2, M5, M6 e NM apresentaram valores intermédios de TCO, não diferindo significativamente entre si. O tratamento MO, que corresponde ao solo mobilizado com crescimento espontâneo, apresentou a menor atividade microbiana de entre todos os tratamentos, distinguindo-se estatisticamente de M1, M3 e M4, mas não diferindo significativamente dos restantes. Este resultado confirma que a mobilização recorrente, aliada à ausência de uma cultura de cobertura densa e

estruturada, reduz a atividade da comunidade microbiana, contribuindo para uma redução significativa da atividade respiratória.

A respiração basal do solo é um indicador de atividade microbiana, refletindo o metabolismo coletivo dos microrganismos, sendo que, um maior valor de consumo de  $O_2$  por massa de solo ( $mg\ O_2/kg/h$ ), equivale a uma maior atividade biológica. Esta, por sua vez, indica que o solo possui microrganismos ativos capazes de utilizar a matéria orgânica disponível como fonte de energia, que por sua vez corresponde, de um ponto de vista ecológico, a uma maior decomposição da matéria orgânica (USDA - United States Department of Agriculture, 2014c). Este é um processo fundamental para a reciclagem eficiente de nutrientes essenciais ao funcionamento do ecossistema, como o azoto e o fósforo, que ficam assim disponíveis para as plantas e outros organismos do ecossistema (Barrios, 2007; Brussaard et al., 2007; Moura et al., 2015). Os valores registados correspondem a uma matriz com um conteúdo em MO estável.

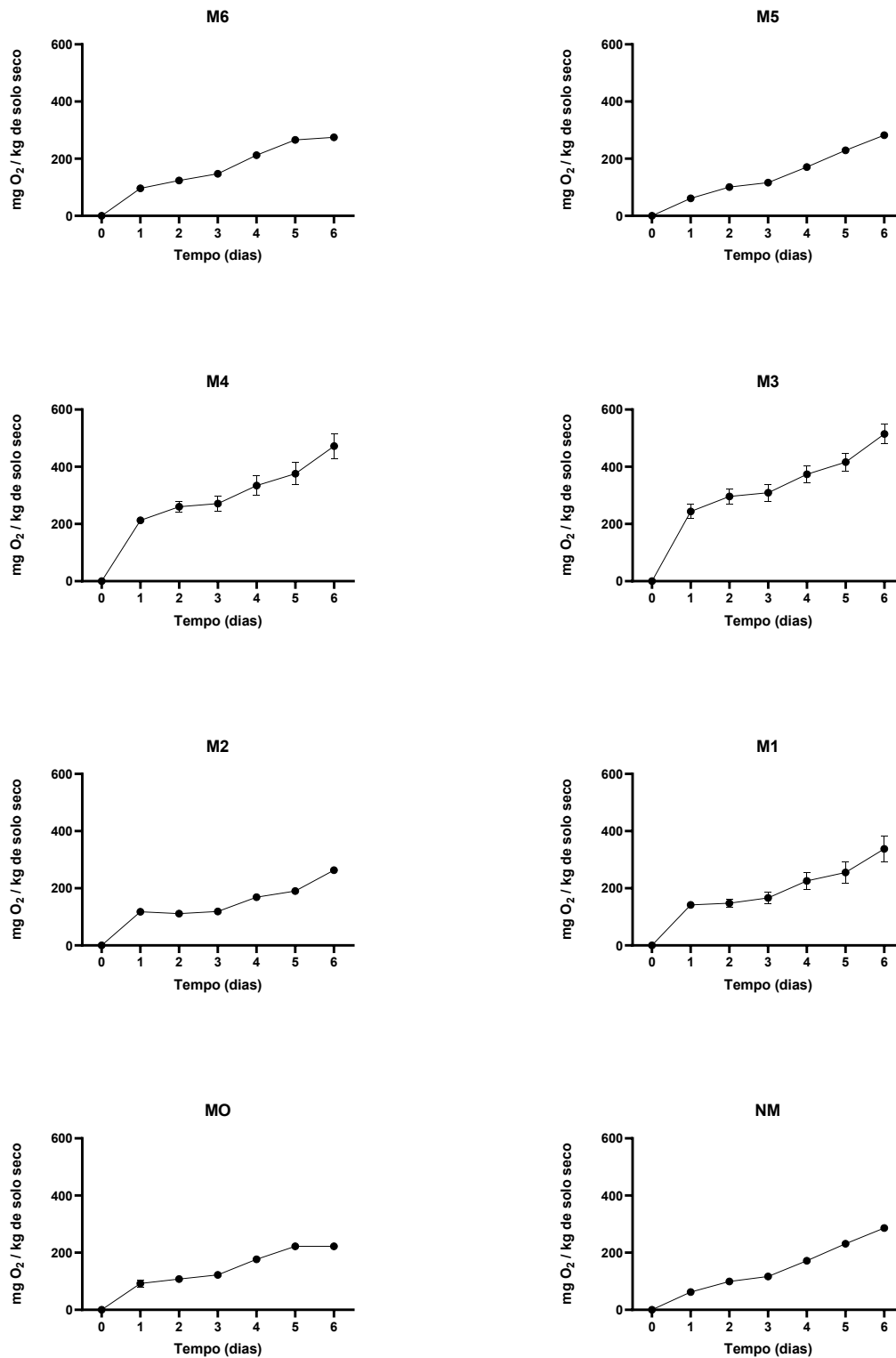


Figura 14 - Taxa de consumo de oxigénio por kg de solo seco, ao longo de 6 dias, para cada tratamento.

#### 4.2.2. Biodiversidade funcional da comunidade microbiana (ensaio de BIOLOG™)

Como esperado o AWCD aumentou ao longo do tempo para todos os tratamentos, refletindo a atividade metabólica crescente dos microrganismos. A Figura 15, mostra que não existem diferenças estatisticamente significativas entre tratamentos no desenvolvimento médio de cor nos poços (AWCD), após as 96h de incubação. Desta forma, todos os tratamentos apresentaram capacidade metabólica global semelhante quando expostos aos 31 substratos do BIOLOG™. Contudo, observa-se que M6 apresentou valores de AWCD ligeiramente superiores, sugerindo maior atividade metabólica microbiana neste solo (Garland, 1997; Zak, et al., 1994). O tratamento M5, por sua vez, apresentou o valor mais baixo, indicando menor capacidade de utilização das fontes de carbono, e possivelmente menor biomassa ou diversidade funcional microbiana (Garland, 1997; Zak, et al., 1994).

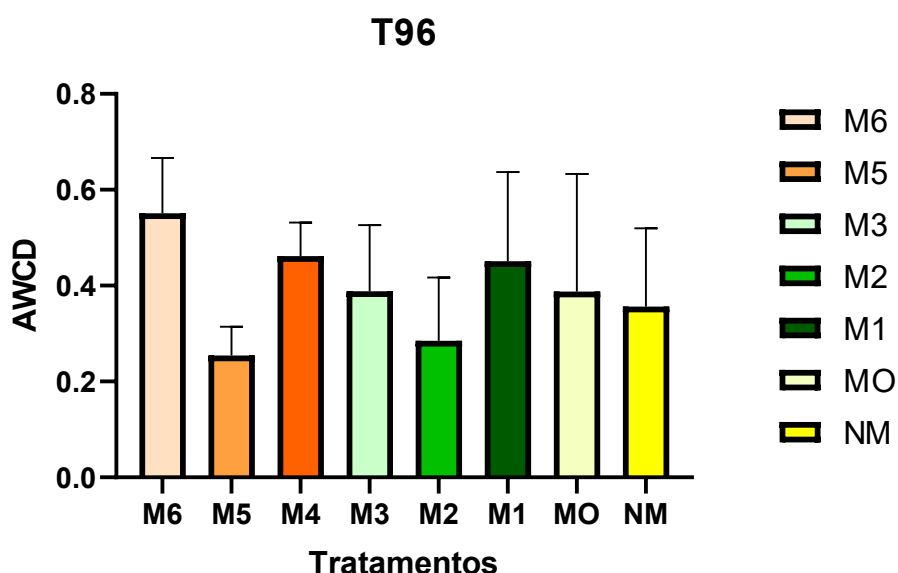


Figura 15 - Desenvolvimento médio de cor nos poços (AWCD) e respetivos desvios padrão, para cada forma de gestão do solo (diferentes misturas de espécies de cobertura (M1-M6) versus mobilização (MO) e não mobilização do solo com vegetação espontânea (NM)), após 96h de incubação do solo exposto a 31 substratos orgânicos diferentes num ensaio de BIOLOG™. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Em relação aos índices de diversidade funcional metabólica (Figura 16), os resultados obtidos para o índice de diversidade de Shannon ( $H'$ ) ao fim das 96h revelam que os diferentes tratamentos apresentaram níveis muito semelhantes de diversidade funcional microbiana. As barras mostram um intervalo estreito, sem diferenças

significativas entre tratamentos, o que indica que, apesar das diferenças na composição das culturas de cobertura e nas práticas de mobilização do solo, a diversidade funcional (capacidade de utilizar uma maior variedade de fontes de carbono) (Zak, et al., 1994) foi semelhante entre todos os tratamentos.

De forma análoga, o índice de uniformidade de Pielou ( $J'$ ) não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, mantendo valores próximos de 1. Estes resultados indicam que, apesar das diferenças na composição das culturas de cobertura e nos sistemas de mobilização, a intensidade de utilização de cada substrato é bastante equilibrada em todos os tratamentos. Assim, a comunidade microbiana não evidencia preferência marcada por alguns substratos em detrimento de outros, nem forte dominância funcional, refletindo uma estrutura funcional equilibrada.

Por outro lado, o índice de riqueza funcional ( $R$ ), que corresponde ao número de substratos efetivamente utilizados, apresentou maior variabilidade entre tratamentos. Ainda que as diferenças não tenham sido significativas, observa-se uma tendência. Os tratamentos M4 e M6 apresentam os valores de riqueza mais elevados, evidenciando comunidades microbianas capazes de utilizar um maior número de substratos. Em contraste, M5, M2 e MO tendem a valores mais baixos, sugerindo menor amplitude funcional e uma comunidade microbiana menos versátil na exploração das fontes de carbono disponíveis.

É possível observar, na Figura 17, que, em geral, todos os grupos de carbono mostram um padrão de aumento da utilização ao longo do tempo, principalmente até T72, seguido de uma estabilização ou ligeiro decréscimo em T96. A utilização mais intensa verifica-se para os carboidratos, ácidos carboxílicos, aminoácidos e mistura. Polímeros e aminas mostram níveis de utilização mais baixos, mas ainda assim, de forma geral, crescentes ao longo do tempo, resultados semelhantes aos relatados por pesquisas anteriores (Ge et al., 2018).

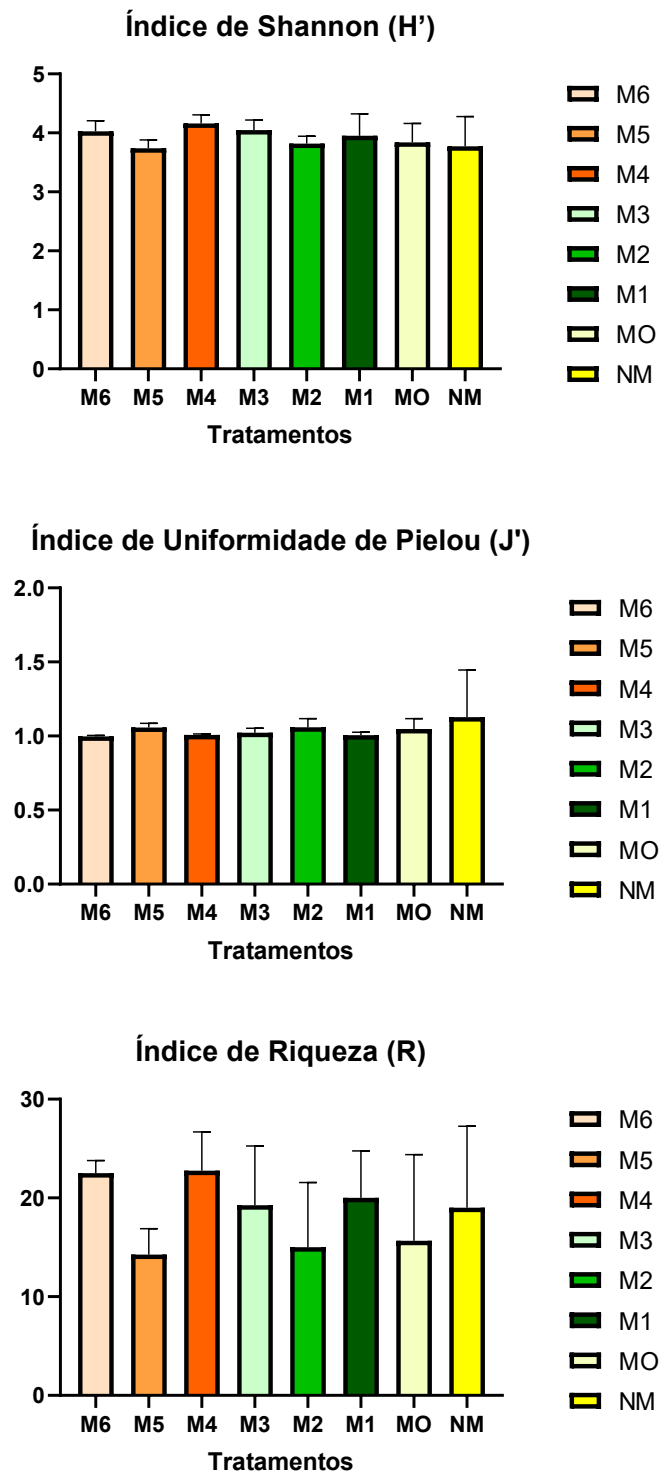


Figura 16 - Índices de diversidade ( $H'$ ), uniformidade de Pielou ( $J'$ ) e riqueza ( $R$ ), médios relativos ao consumo de substratos e respetivos desvios padrão, para cada forma de gestão do solo (diferentes misturas de espécies de cobertura (M1-M6) versus mobilização (MO) e não mobilização do solo com vegetação espontânea (NM)), após 96h de incubação do solo exposto a 31 substratos orgânicos diferentes num ensaio de BIOLOG<sup>TM</sup>. Não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Na análise por grupos ao fim das 96h de incubação (Figura 18), apenas os polímeros apresentaram diferenças significativas. O tratamento M6 destacou-se com a maior metabolização de polímeros, sendo significativamente superior a M5 e NM, que exibiram os valores mais baixos. Este padrão indica que o tratamento M6 promove uma comunidade microbiana mais ativa e diversificada (Zak, et al., 1994), apta à degradação de compostos complexos, como celulose e amidos, ao contrário de M5 e NM, cuja utilização de polímeros foi mais limitada.

M4, M3, M1 e também M6 destacaram-se, no geral, com valores de utilização das fontes de carbono mais elevados enquanto que os tratamentos M5 e M2 têm valores sistematicamente mais baixos em todos os grupos, confirmando menor atividade metabólica. Embora os tratamentos com misturas de sementes (em especial M4, M6, M1 e M3) tenham demonstrado maior atividade e diversidade funcional microbiana, nem todas as misturas apresentaram bons resultados. M5 e M2 revelaram desempenhos mais baixos, até inferiores aos solos com crescimento espontâneo (MO e NM).

Comparando com os resultados de respiração basal do solo, embora alguns tratamentos se tenham destacado por uma maior taxa de consumo de oxigénio (M3 e M4) não se destacaram pela diversidade metabólica no ensaio de BIOLOG™, indicando que uma atividade respiratória mais elevada no solo não implica necessariamente maior diversidade metabólica. Complementarmente, M6, apesar de não apresentar a maior TCO, registou de forma geral a maior capacidade funcional no BIOLOG™, reforçando que estes dois indicadores refletem aspetos complementares da atividade microbiana. Em conjunto, os resultados sugerem que diferentes misturas de espécies de cobertura influenciam distintos aspetos da comunidade microbiana do solo. O tratamento M6 favorece, de forma geral, uma maior versatilidade e potencial metabólico, ao passo que M3 e M4 promovem maior atividade respiratória. Por outro lado, M5, NM e MO tendem a suportar comunidades ligeiramente menos ativas e/ou menos diversificadas. Estes padrões reforçam a importância da composição das misturas de cobertura no funcionamento microbiano do solo e demonstram que diferentes indicadores (AWCD e TCO) fornecem informação complementar sobre o estado da comunidade microbiana e o potencial de funcionamento dos ecossistemas edáficos.

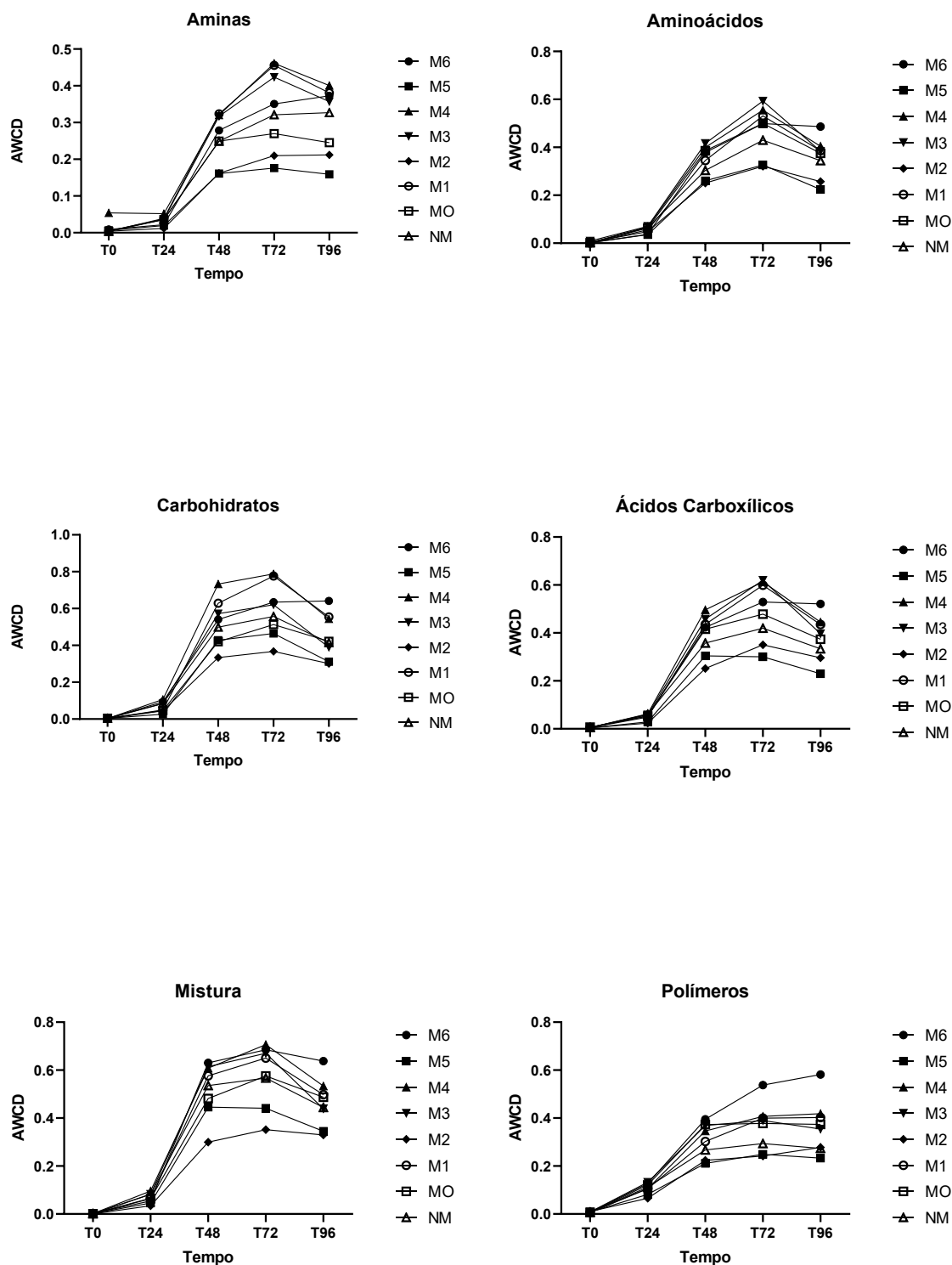


Figura 17 - Desenvolvimento médio de cor nos poços (AWCD), em cada fonte de carbono utilizada no ensaio, e respetivos desvios padrão, para cada forma de gestão do solo (diferentes misturas de espécies de cobertura (M1-M6) versus mobilização (MO) e não mobilização do solo com vegetação espontânea (NM)), ao longo de 96h de incubação do solo exposto a 31 substratos orgânicos diferentes num ensaio de BIOLOG™.

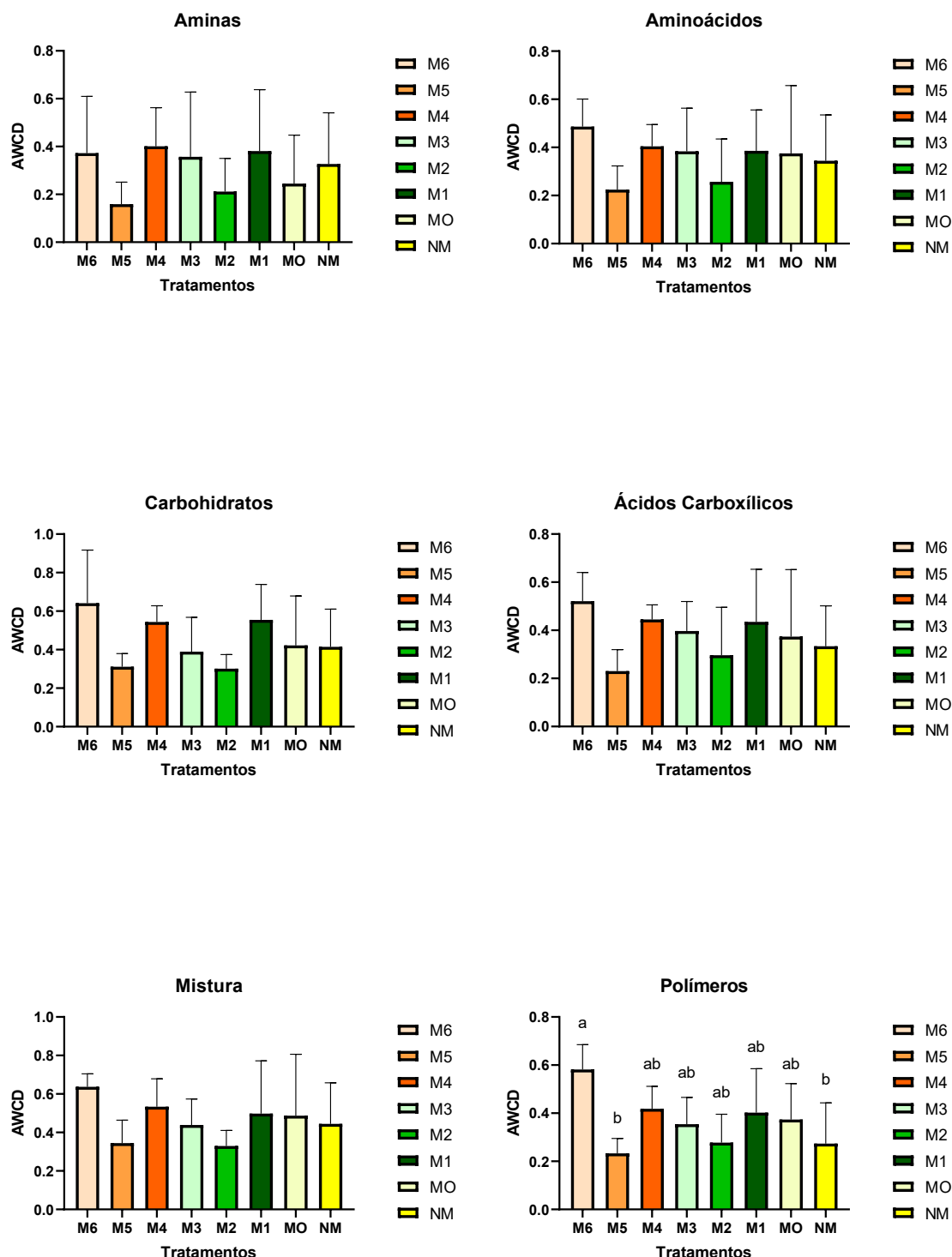


Figura 18 - Desenvolvimento médio de cor nos poços (AWCD), em cada fonte de carbono utilizada no ensaio, e respetivos desvios padrão, para cada forma de gestão do solo (diferentes misturas de espécies de cobertura (M1-M6) versus mobilização (MO) e não mobilização do solo com vegetação espontânea (NM)), após 96h de incubação do solo exposto a 31 substratos orgânicos diferentes num ensaio de BIOLOG™. As diferenças significativas entre tratamentos, considerando  $p \leq 0,05$ , estão assinaladas com letras acima das barras.

### 4.3. Levantamento florístico

Pode ser observado, através dos índices (Figura 18), que a maior diversidade está associada aos tratamentos M5 e M6, que apresentam medianas mais altas (cerca de 1,7 a 1,8). Os tratamentos NM, MO e M3 têm valores medianos intermédios, próximos de 1,3 a 1,5, enquanto M1 e M2 apresentam as medianas mais baixas, e, portanto, menor diversidade. O tratamento M4 mostra uma mediana maior que a de M1 e M2, no entanto maior variabilidade (dispersão), indicando menor diversidade e também maior heterogeneidade nos resultados.

Valores mais altos de D indicam maior dominância, ou seja, é possível observar que o tratamento M4 apresenta a maior dominância, seguido de M2, e M1, observando-se, também, novamente que M4 apresenta maior heterogeneidade nos resultados. MO, NM, M5 e M6 têm valores mais baixos, sugerindo comunidades mais equilibradas, com menor dominância de espécies, com destaque para os tratamentos M5 e M6.

O tratamento M6 mostra a maior riqueza de espécies, com medianas em torno de 7 a 8, sendo que M5 e MO também têm valores relativamente altos. M3 e NM apresentam valores intermédios de riqueza, enquanto M1 e M2 apresentam a menor riqueza, com uma mediana ligeiramente acima de 4.

O tratamento M6 destacou-se consistentemente com maior riqueza de espécies (S) e maior diversidade ( $H'$ ), além de baixa dominância (D), parecendo ser o tratamento mais favorável em termos de biodiversidade. Isto é confirmado pelos gráficos de percentagem de cobertura, sendo que M6 possui uma maior riqueza específica com percentagens de cobertura relativamente equilibradas entre as espécies, sem uma espécie claramente dominante. M4, por outro lado, apresenta baixa diversidade ( $H'$ ) e alta dominância (D). Isto também é visível nos gráficos de percentagem de cobertura, onde se observam espécies com percentagens de cobertura baixas, que não estão presentes em todas as réplicas, como *Lolium multiflorum* e *Trifolium pratense*, bem como uma dominância acentuada da espécie *Trifolium incarnatum* em algumas das réplicas, sugerindo uma comunidade mais desequilibrada em que algumas espécies dominam significativamente. Tratamentos como MO, NM e M5 parecem manter uma comunidade equilibrada.

Observando a tabela de espécies semeadas (Tabela 1), por tratamento e os gráficos de percentagem de cobertura (Figura 19), é possível verificar que nem todas as espécies semeadas tiveram um desenvolvimento bem sucedido, e que espécies espontâneas (não semeadas) surgiram em todos os tratamentos.

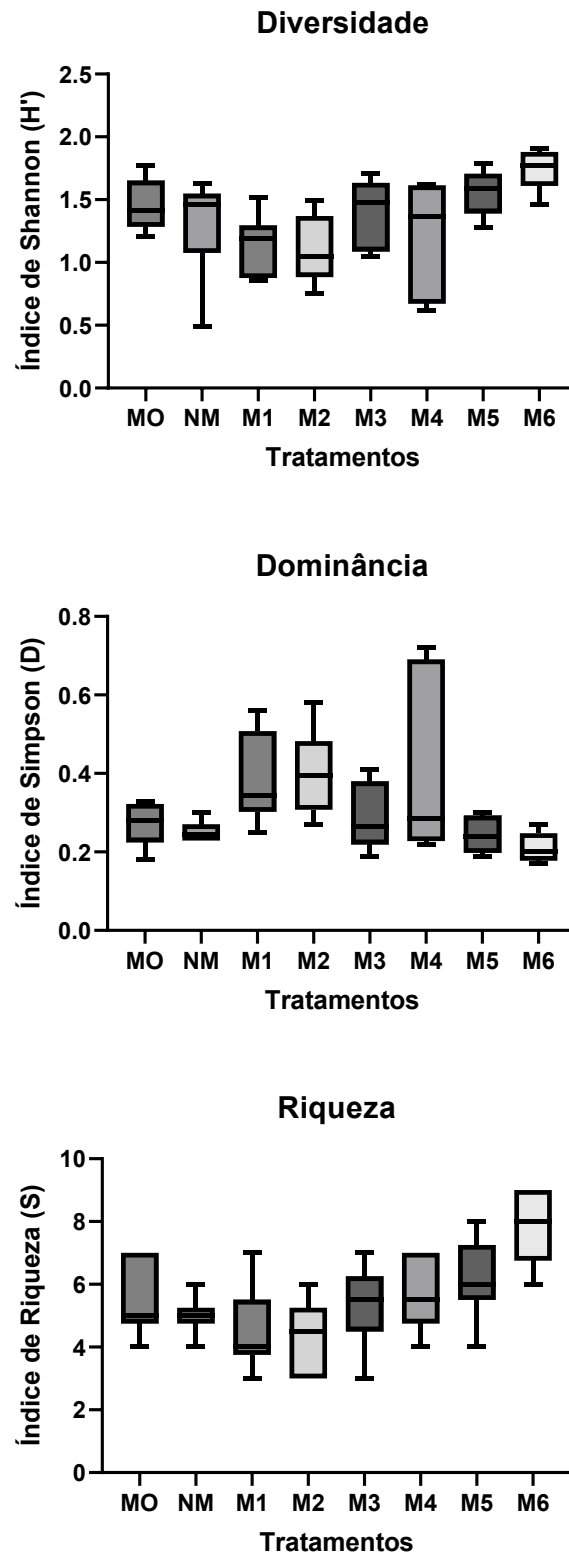


Figura 19 - Índices de diversidade, dominância e riqueza, médios, para cada tratamento de cobertura do solo com diferentes misturas (M1 a M6) e de espécies espontâneas no solo não mobilizado (NM) e mobilizado (MO).

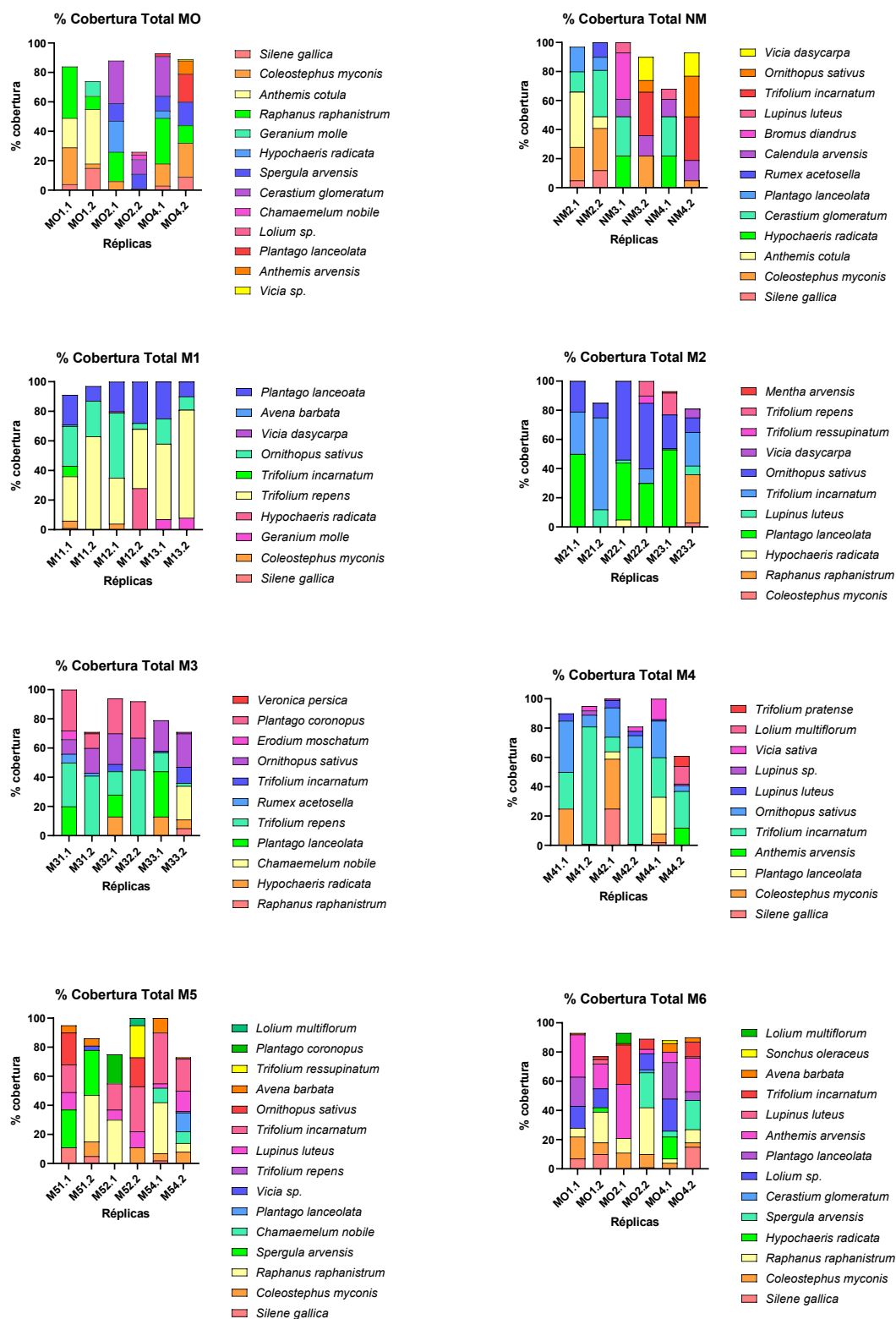


Figura 20 - Percentagens relativas de cobertura de cada espécie identificada nos tratamentos de cobertura do solo com diferentes misturas (M1 a M6) e de espécies espontâneas no solo não mobilizado (NM) e mobilizado (MO).

Em M1 (Figura 19) observamos que das espécies com maior dominância apenas uma estava incluída na sementeira original (*Ornithopus sativus*), sugerindo que as espécies introduzidas não se estabeleceram bem. *Trifolium repens* e *Plantago lanceolata*, também apareceram bem estabelecidas neste tratamento apesar de não constarem da mistura inicial. São ambas espécies que se observam frequentemente nos restantes tratamentos sendo que apenas *Trifolium repens* consta na lista de espécies semeadas, nomeadamente no tratamento M3. *Ornithopus sativus*, *Trifolium incarnatum* e *Plantago lanceolata* são as espécies dominantes em M2, sendo que *Plantago lanceolata*, mais uma vez, não constava da sementeira original. Neste tratamento temos ainda *Trifolium resupinatum*, uma das espécies originalmente introduzidas neste tratamento, a aparecer na cultura, no entanto com uma presença reduzida. Apesar destes tratamentos apresentarem a maior percentagem de cobertura, face aos restantes, ambos apresentaram, também, a riqueza de espécies mais baixa, como é possível observar através dos seus índices de riqueza, e dos maiores índices de dominância (Figura 18) indicando que um reduzido número de espécies conseguiu dominar sobre as restantes. Inclusivamente, através dos valores do índice de Shannon (H') verifica-se também que estas são as misturas com menor diversidade.

Em M3, há maior presença de espécies espontâneas, ou espécies não presentes na mistura original (como *Plantago lanceolata*, *Ornithopus sativus* e *Plantago coronopus*), com a presença de *Trifolium repens* como a única espécie presente na sementeira original, demonstrando uma incapacidade das espécies semeadas em estabelecer-se com sucesso. Observando o seu gráfico de percentagem de cobertura total (Figura 19) M3 é o tratamento com a menor percentagem, segundado apenas para o tratamento MO. Nos seus índices de diversidade, riqueza e dominância de espécies (Figura 18) observam-se valores intermédios, comparando com os restantes tratamentos.

M4 apresentou uma boa capacidade de implantação (Figura 19), com todas as espécies da mistura presentes, mas com destaque para *Trifolium incarnatum* e *Ornithopus sativus*, a exhibir uma boa presença. Espécies como *Plantago lanceolata* e *Coleostephus myconis*, espécies espontâneas, também surgiram com uma presença marcante. Observando os seus índices (Figura 18) M4 foi o tratamento, juntamente com M2, que apresentou o maior índice de dominância sendo visível nos gráficos de percentagem de cobertura (Figura 19) uma dominância acentuada da espécie *Trifolium incarnatum* em algumas das réplicas de M4. Juntamente com *Plantago lanceolata* e *Ornithopus sativus*, estas espécies sugerem uma alta competitividade, influenciando

fortemente os índices de dominância, para os tratamentos M2 e M4. Apesar disto, foi um dos tratamentos que apresentou maior riqueza de espécies, no entanto de acordo com o índice de Shannon, é também um dos tratamentos com a menor diversidade de espécies, devido à dominância de algumas, bem como um dos tratamentos com menor percentagem de cobertura, oferecendo possivelmente menor diversidade de serviços ecossistémicos.

Os tratamentos M5 e M6 mostram uma mistura mais equilibrada entre espécies semeadas e espontâneas, indicando um certo equilíbrio entre cobertura intencional e colonização natural, no entanto ainda assim apresenta um maior número de espécies espontâneas. Apesar de uma percentagem de cobertura intermédia (Figura 19), estes tratamentos apresentaram os maiores índices de riqueza e diversidade, bem como o menor índice de dominância (Figura 18), sugerindo que essas sementeiras proporcionaram um ambiente favorável à convivência entre espécies semeadas e espontâneas, com M6 destacando-se ligeiramente em relação a M5. É importante, no entanto referir que ambos os tratamentos são muito semelhantes, apresentando-se como dois dos tratamentos com o maior número de espécies semeadas, destacando-se novamente M6 como o tratamento com maior número de espécies introduzidas. A maior riqueza específica pode ter, portanto, resultado numa competição acentuada, levando a um equilíbrio moderado entre dominância e diversidade. Para promover uma maior biodiversidade, controlar pragas naturalmente, bem como melhorar a fertilidade e estrutura do solo, M6 parece ser, portanto, a melhor escolha, equilibrando boa cobertura total (importante para reduzir erosão e competição com espécies de plantas infestantes) com diversidade e riqueza de espécies.

Em NM e MO observamos novamente a presença de espécies como, *Plantago lanceolata*, *Coleostephus myconis* e *Silene gallica* (Figura 19), espécies presentes um pouco por todos os tratamentos, mas inexistentes nas sementeiras introduzidas (Tabela 1). *Trifolium repens*, espécie frequentemente presente nos restantes tratamentos não se encontra presente em nenhum dos tratamentos de crescimento espontâneo, sugerindo que esta espécie veio efetivamente de uma das sementeiras (possivelmente M3) e poderá ter se proliferado nas restantes. Observamos também espécies como *Ornithopus sativus* e *Trifolium incarnatum* com alguma presença em NM e *Raphanus raphanistrum*, outra espécie espontânea presente em alguns dos restantes tratamentos, com alguma presença no tratamento MO. Ambos apresentaram índices de riqueza intermédios (Figura 18), o que seria de certa forma esperado em comunidades espontâneas com competição natural, com os melhores valores de diversidade e

dominância, em relação aos restantes tratamentos, indicando comunidades mais equilibradas, inferiores apenas a M5 e M6, com NM a destacar-se ligeiramente em relação a MO. Em relação à percentagem de cobertura NM apresentou uma cobertura elevada (inferior apenas, mais uma vez, a M5 e M6), que potencialmente protege melhor o solo contra erosão e mantém um melhor microclima, enquanto MO apresentou a pior percentagem de cobertura de todos os tratamentos, deixando o solo mais exposto e vulnerável à erosão e ao crescimento rápido de infestantes.

Quando se compara a lista de espécies por mistura (Tabela 1) com os gráficos de percentagem de cobertura (Figura 19), percebe-se uma forte presença de espécies não semeadas, para os tratamentos M1 a M6. Tal pode ter ocorrido devido a problemas na sementeira em que fatores como a profundidade e/ou distribuição, podem causar falhas de germinação, bem como chuva irregular logo após a mesma, ou até pela presença de sementes de anos anteriores que germinam e competem com as semeadas, pois muitas espécies espontâneas germinam e crescem mais rápido que as espécies semeadas, ocupando o espaço e luz antes que as coberturas consigam estabelecer-se (Fontão De Lima et al., 2023). Os gráficos de percentagem de cobertura (Figura 19) demonstram que nem todas as espécies semeadas se estabeleceram igualmente, reforçando a importância da escolha de espécies adequadas aos objetivos da cobertura, bem como a monitorização e ajuste das misturas ao longo do tempo. Algumas espécies acabaram com uma cobertura muito baixa ou sem qualquer representação na mistura. A pressão ambiental como condições do solo, seca ou excesso de chuva, pode também dificultar o estabelecimento de algumas plantas semeadas (Fontão De Lima et al., 2023). Os resultados demonstram, portanto, que espécies semeadas nem sempre dominam o tratamento onde foram introduzidas. Na maioria dos tratamentos as espécies espontâneas foram, inclusivamente, mais dominantes e/ou exibiram uma maior presença nos tratamentos (especialmente em M3).

Assim, o estabelecimento efetivo das espécies semeadas pode estar parcialmente dependente da mistura, mas também de fatores ecológicos e edafoclimáticos (tipo de solo, competição, humidade, solo, etc.). Para sistemas que visam equilibrar cobertura, biodiversidade e evitar dominância excessiva de certas espécies, é, portanto, recomendável manter misturas diversificadas (como M5 e M6).

Também podemos observar através dos dados obtidos (Figuras 18 e 19) que os tratamentos com maior percentagem de cobertura não são os mais ricos em espécies, com M1 e M2 a apresentarem elevada percentagem de cobertura, mas baixa riqueza, diversidade e alta dominância, enquanto que M5 e M6 apresentaram cobertura mais

baixa, mas riqueza e diversidade mais alta, bem como dominância mais baixa. Os resultados também sugerem que tratamentos com maior número de espécies podem equilibrar índices de diversidade, riqueza e dominância, possivelmente através da competição, favorecendo assim o equilíbrio entre espécies semeadas e espontâneas (M5 e M6).

Apesar de M1 e M2 terem apresentado as maiores percentagens de cobertura, e esta estar fortemente correlacionada com maior entrada de resíduos vegetais no solo, resultando em microambientes mais favoráveis, M2 teve fraca resposta microbiana, o que indica que a qualidade da cobertura (tipo de espécies) poderá ser mais relevante do que apenas a quantidade. M6 e M5 demonstraram, maior diversidade florística e riqueza, com baixa dominância, o que está geralmente associado a uma gama mais ampla de exsudatos radiculares, favorecendo a diversidade microbiana (Bardgett & Van Der Putten, 2014; Eisenhauer et al., 2010). No entanto, M5, analogamente a M2, foi um dos tratamentos que apresentou piores resultados de atividade metabólica. Os tratamentos com melhores resultados microbiológicos (M4, M6, M3, M1), por sua vez não coincidem propriamente com os mais equilibrados e diversos floristicamente, com exceção de M6. M3 e M4 não apresentaram os índices de diversidade, riqueza e dominância mais favoráveis, no entanto foram os três tratamentos que apresentaram valores mais elevados no que diz respeito à respiração basal do solo, sugerindo uma maior atividade biológica, em relação aos restantes tratamentos.

Em geral, M6 e M5, compostos por uma mistura de plantas anuais leguminosas, gramíneas e crucíferas, parecem ser os tratamentos mais equilibrados e sustentáveis, com boa cobertura, alta diversidade e riqueza, menor dominância, e valores de respiração intermédios. M1 e M2 apresentam a melhor cobertura, mas baixa diversidade e riqueza, e valores de dominância altos, M2 apresentou os piores resultados em todos os índices, face a M1, incluindo um dos valores mais baixos de respiração basal do solo (segundo apenas para MO), de entre todos os tratamentos. M3 e M4 apresentaram valores semelhantes, e os valores de respiração mais elevados, em relação aos restantes tratamentos, no entanto baixa cobertura, e alta dominância, sobretudo M4.

Os tratamentos espontâneos (MO e NM) sugeriram que a mobilização do solo (MO) reduz a percentagem de cobertura e aumenta a dominância de espécies, enquanto que o não mobilizado (NM) mantém uma boa percentagem de cobertura e menor dominância de espécies, permitindo que se estabeleça uma comunidade mais estável, diversa e funcional. NM mostrou-se mais favorável, de forma geral, que MO, apesar de apresentar riqueza mais baixa, mostrando que a não mobilização preserva melhor as

funções do solo. MO parece comprometer tanto a cobertura vegetal como a atividade microbiana, apresentando os valores mais baixos de respiração e cobertura, apesar de apresentar valores intermédios para os restantes índices.

## Conclusão

Em termos físico-químicos, não se registaram diferenças com elevado significado ecológico entre os diferentes tratamentos de cobertura e de gestão do solo. Os valores de pH com água que refletem a acidez ativa, variaram moderadamente entre estações do ano e entre tratamentos, sendo, contudo, sempre moderadamente ácido (próximo de 6). Do mesmo modo os valores de condutividade mais elevados, foram registados no outono, sobretudo no tratamento M4. Os valores de MO (%) foram elevados em todos os solos, assim como os teores de carbono orgânico, fatores determinantes da atividade microbiana. O CO mostrou tendência para apresentar valores mais elevados no outono, sobretudo nos tratamentos M5 e NM. Em linha com estes resultados, observaram-se também bons teores de fósforo disponível, sendo este um fator favorável à atividade microbiana e ao desenvolvimento vegetal, com valores mais elevados em M4. Estes resultados, aliados a uma boa estrutura (densidade aparentemente baixa e elevada capacidade de retenção de água) favorecem a estabilidade e fertilidade do solo, aumentando a sua resistência à compactação e à erosão. Adicionalmente, estes contribuem também, para uma infiltração da água mais eficiente, que por sua vez leva a uma maior disponibilidade hídrica para as videiras, reforçando a resiliência do ecossistema e permitindo que o solo suporte melhor eventos climáticos extremos, como chuvas intensas ou períodos de seca prolongada. Estes resultados sugerem, portanto, que estamos perante um solo saudável e de qualidade, sendo, contudo, importante de futuro analisar a biodisponibilidade do arsénio, dado que as concentrações totais deste elemento foram elevadas em todos os solos. Esta ocorrência pode ter origem geogénica e, portanto, não ter impacto na saúde do solo.

Estes resultados reforçam as conclusões observadas no estado da arte, demonstrando que as culturas de cobertura podem promover serviços ecossistémicos relevantes, mas o sucesso depende de uma seleção cuidadosa das misturas. É necessária a adaptação destas misturas para o ambiente edáfico e climático em questão, e de uma gestão adequada da interação com a flora espontânea, para que estas se tornem casos de sucesso e sustentabilidade. As culturas de cobertura correspondentes aos tratamentos, M5 e M6 destacaram-se pela maior diversidade e riqueza de espécies, com baixa dominância, favorecendo comunidades equilibradas e estáveis, enquanto que M1 e M2 apresentaram elevada cobertura, mas baixa diversidade, com forte dominância de espécies. A interação com a vegetação espontânea foi relevante e revelou que muitas espécies semeadas não se

estabeleceram plenamente devido a possível competição ou a fatores ambientais, confirmando que a adaptação da composição das misturas ao contexto local é um fator determinante na sua subsistência.

No que diz respeito à atividade e diversidade microbiana, observou-se que M3, M4, M6 e M1 apresentaram comunidades mais ativas e diversificadas, enquanto que M5 e M2 revelaram atividade metabólica inferior mesmo aos tratamentos espontâneos (MO e NM). Os valores inferiores de taxa de consumo de oxigénio, não representam necessariamente uma comunidade microbiana comprometida, podendo antes refletir uma comunidade estável, capaz de reciclar os nutrientes e de os incorporar na sua biomassa, e de os disponibilizar para as plantas de forma gradual. O único aspeto a destacar reside no facto de as comunidades microbianas do solo M5 e NM se terem revelado funcionalmente mais limitadas, pela sua capacidade de degradar substratos mais complexos como polímeros.

Assim, este estudo confirma a importância das culturas de cobertura como ferramenta estratégica para aumentar a sustentabilidade da viticultura, contribuindo para a conservação do solo, a sua biodiversidade, e a resiliência dos agroecossistemas, sendo, contudo claro que nem todas as misturas têm o mesmo sucesso no estabelecimento. Por esta razão, com base nos resultados obtidos não é possível sugerir qual a melhor mistura para a área de estudo, nem concluir se as misturas de longa duração são uma melhor opção comparativamente às anuais.

## Referências Bibliográficas

- Abad, J., Hermoso De Mendoza, I., Marín, D., Orcaray, L., & Santesteban, L. G. (2021). Cover crops in viticulture. A systematic review (1): Implications on soil characteristics and biodiversity in vineyard. In *Oeno One* (Vol. 55, Issue 1, pp. 295–312). Vigne et Vin Publications Internationales. <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2021.55.1.3599>
- Abreu, F. S. (2020). *Efeito do Terroir no Perfil do Vinho da Casta Alvarinho*.
- Adetunji, A. T., Ncube, B., Mulidzi, R., & Lewu, F. B. (2020). Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. In *Soil and Tillage Research* (Vol. 204). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2022). *Solos Contaminados-Guia Técnico VALORES DE REFERÊNCIA PARA O SOLO*.
- Arnold, D. Gordon., Beauchamp, T. L. ., & Bowie, N. E. . (2014). *Ethical theory and business*. Pearson Education Limited.
- Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez. (2025a). *Vinhos de Arcos de Valdevez*. <http://vinhos.arcosdevaldevez.pt>
- Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez. (2025b). *Vinhos de Arcos de Valdevez, CVRVV*. <https://portal.vinhoverde.pt/pt/instalacoes>
- Associação dos Vinhos de Arcos de Valdevez. (2025c). *Vinhos de Arcos de Valdevez, Viticultura*. <https://viticultura.vinhoverde.pt/pt/sanidade-da-videira-doencas>
- Aveleda. (2025). *Região dos Vinhos Verdes*. <https://aveleda.com/pt/sobre-nos/regiao-dos-vinhos-verdes>
- Ball, K. R., Baldock, J. A., Penfold, C., Power, S. A., Woodin, S. J., Smith, P., & Pendall, E. (2020). Soil organic carbon and nitrogen pools are increased by mixed grass and legume cover crops in vineyard agroecosystems: Detecting short-term management effects using infrared spectroscopy. *Geoderma*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114619>
- Bansal, S., Gonzalez-Maldonado, N., Yao, E., Wong, C. T. F., Adamo, I., Acin-Albiac, M., Garcia-Jimenez, B., Acedo, A., & Lazcano, C. (2024). Regenerative soil management practices no-till and sheep grazing induce significant but contrasting

- short-term changes in the vineyard soil microbiome. *Plants People Planet*.  
<https://doi.org/10.1002/ppp3.10575>
- Barbosa, M., Loss, T., Da, B., Dutra, R., Todeschini, E. Â., Luiz, J., Filho, M., Brighenti, A. F., & Loss, A. (2025a). *Plantas de cobertura para solos de vinhedos: principais espécies e benefícios edáficos*.
- Barbosa, M., Loss, T., Da, B., Dutra, R., Todeschini, E. Â., Luiz, J., Filho, M., Brighenti, A. F., & Loss, A. (2025b). *Plantas de cobertura para solos de vinhedos: principais espécies e benefícios edáficos*.
- Bardgett, R. D., & Van Der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. In *Nature* (Vol. 515, Issue 7528, pp. 505–511). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
- Barrios, E. (2007). Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*, 64(2), 269–285. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
- Beaumelle, L., Auriol, A., Grasset, M., Pavy, A., Thiéry, D., & Rusch, A. (2021). Benefits of increased cover crop diversity for predators and biological pest control depend on the landscape context. *Ecological Solutions and Evidence*, 2(3). <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12086>
- Bhatta, A., Prasad, R., Chakraborty, D., Shaw, J. N., Lamba, J., Brantley, E., & Torbert, H. A. (2021). Mehlich 3 as a generic soil test extractant for environmental phosphorus risk assessment across Alabama soil regions. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, 4(3). <https://doi.org/10.1002/agg2.20187>
- Breiter, K., Ďurišová, J., Korbelová, Z., Vašinová Galiová, M., & Hložková, M. (2023). Granite Pluton at the Panasqueira Tungsten Deposit, Portugal: Genetic Implications as Revealed from New Geochemical Data. *Minerals*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/min13020163>
- Brussaard, L., de Ruiter, P. C., & Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(3), 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.013>
- Calouro Autores, F., Veloso, A., Sempiterno, C., Calouro, F., Rebelo, F., Pedra, F., Castro, I. V, da Conceição Gonçalves, M., da Encarnação Marcelo, M., Pereira, P., Fareleira, P., Jordão, P., Mano Rui Fernandes Colaboração, R., Curto, A., Lopes,

- A., Dias, A., Raposo, A., Maças, B., Ferreira, E., & Monteiro João Moura, I. M. (2022). *FICHA TÉCNICA Título: Manual de fertilização das culturas*.
- CAP - Confederação dos Agricultores de Portugal. (2023). *Approved 28 CAP Strategic Plans (2023-2027) - Summary overview for 27 Member States - Facts and figures*.
- Carranca, C. (2022). O COBERTO VEGETAL EM POMARES E VINHA: EFEITOS NA PRODUÇÃO, QUALIDADE DOS FRUTOS E QUALIDADE DO SOLO. In *Ciências agrárias: Estudos sistemáticos e pesquisas avançadas 2* (pp. 43–58). Atena Editora. <https://doi.org/10.22533/at.ed.0412222115>
- Cataldo, E., Salvi, L., Sbraci, S., Storchi, P., & Mattii, G. B. (2020). Sustainable Viticulture: Effects of Soil Management in *Vitis vinifera*. *Agronomy*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy10121949>
- Cazzaniga, S. G., Braat, L., van den Elsen, S., Lombaers, C., Visser, J., Obinu, L., Maciá-Vicente, J. G., Postma, J., Mommer, L., & Helder, J. (2023). Pinpointing the distinctive impacts of ten cover crop species on the resident and active fractions of the soil microbiome. *Applied Soil Ecology*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105012>
- Çerçioğlu, M., Udawatta, R. P., & Anderson, S. H. (2025). Use of cover crops for sustainable management of soil condition and health: A review. In *Soil Security* (Vol. 18). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2025.100177>
- Cherubin, M. R. (2022). *Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo*. Universidade de São Paulo - USP. <https://doi.org/10.11606/9786589722151>
- Climaco P. et al. (2012). *O Clima vitícola das Principais Regiões Produtoras de Uvas para Vinho de Portugal*.
- Clube Vinhos Portugueses. (2014). *Região Demarcada Dos Vinhos Verdes – Clima e Relevo; Geologia e Solos*.
- CMAV - Câmara Municipal de Arcos de Valdevez. (2025). *Município Arcos de Valdevez*. <https://www.cmav.pt/pages/1806>
- Conyers, M. K., Uren, N. C., Helyar, K. R., Poile, G. J., & Cullis, B. R. (1997). Temporal variation in soil acidity. *Australian Journal of Soil Research*, 35(5), 1115–1129. <https://doi.org/10.1071/S97022>

- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3 SPEC. ISS.), 11–43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>
- Costa, J., António, M., Serra, D., & António, N. (2023). *ENOTURISMO SUSTENTÁVEL NO ALGARVE: UM ESTUDO SOBRE AS PERCEÇÕES DOS AGENTES ECONÓMICOS SUSTAINABLE WINE TOURISM IN THE ALGARVE: A STUDY ON THE PERCEPTIONS OF ECONOMIC AGENTS*. <https://revistas.rcaap.pt/index.php/thij/index>
- De Bernardi, A., Marini, E., Tagliabue, F., Brunetti, G., Casucci, C., Rossa, Ü. B., Silvestroni, O., & Vischetti, C. (2025). Organic matter evolution and microbial activity in a vineyard soil after four years of inter-row cover crop management. *Applied Soil Ecology*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105868>
- Dzvene, A. R., Tesfahuney, W. A., Walker, S., & Ceronio, G. (2023). Management of Cover Crop Intercropping for Live Mulch on Plant Productivity and Growth Resources: A Review. In *Air, Soil and Water Research* (Vol. 16). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/11786221231180079>
- Eisenhauer, N., Beßler, H., Engels, C., Gleixner, G., Habekost, M., Milcu, A., Partsch, S., Sabais, A. C. W., Scherber, C., Steinbeiss, S., Weigelt, A., Weisser, W. W., & Scheu, S. (2010). Plant diversity effects on soil microorganisms support the singular hypothesis. *Ecology*, 91(2), 485–496. <https://doi.org/10.1890/08-2338.1>
- Espinoza, L. (2021). *Agriculture and Natural Resources Understanding the Numbers on Your Soil Test Report*. <https://www.uaex.uada.edu>
- European Soil Data Centre (ESDAC). (2025). *Soil Data Maps*. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/soil-data-maps>
- Fernando, M., Scott, N., Shrestha, A., Gao, S., & Hale, L. (2024). A native plant species cover crop positively impacted vineyard water dynamics, soil health, and vine vigor. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108972>
- Fisher, D., Taylor, A., Gordon, C., & Magarey, P. (2007). *Digital Library Digital Library Bulletins 4000-Agriculture 5-2007 Downy mildew in vineyards Downy mildew in vineyards*. <https://library.dpird.wa.gov.au/bulletins>

- Flodin, Mickey. (2006). *Guidelines for soil description*. Food & Agriculture Org.
- Fontão De Lima, O., Edmilson, F., Ambrosano, J., Bahia, E., Fabrício, W., José, R., Donizeti, A., & Técnicos Volume, C. E. (2023). *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil 2ª edição revista e atualizada Fundamentos e Prática*.
- García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J. L., Alonso-Ayuso, M., & Quemada, M. (2018). Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma*, 322, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.024>
- Garland, J. L. (1997). Analysis and interpretation of community-level physiological profiles in microbial ecology. *FEMS Microbiology Ecology*, 24(4), 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00446.x>
- Gatti, M., Garavani, A., Squeri, C., Capri, C., Diti, I., D'Ambrosio, R., Frioni, T., Scotti, C., & Poni, S. (2022). Inter-row floor management is a powerful factor for optimising vine balance in a non-irrigated organic Barbera vineyard in northern Italy. *European Journal of Agronomy*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126490>
- Ge, Z., Du, H., Gao, Y., & Qiu, W. (2018). Analysis on metabolic functions of stored rice microbial communities by BIOLOG ECO microplates. *Frontiers in Microbiology*, 9(JUL). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01375>
- Gessler Cesare, Pertot Ilaria, & Perazzolli Michele. (2011). *Plasmopara viticola: a review of knowledge on downy mildew of grapevine and effective disease management*.
- Global Soil Laboratory Network, & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Standard operating procedure for soil electrical conductivity, soil/water*, 1:5. <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>
- Guerra, J. G., Cabello, F., Fernández-Quintanilla, C., Peña, J. M., & Dorado, J. (2022). How weed management influence plant community composition, taxonomic diversity and crop yield: A long-term study in a Mediterranean vineyard. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107816>
- Helder Marques. (1987). Região demarcada dos vinhos verdes. *Revista Da Faculdade de Letras - Geografia I Série, Vol. III, Porto 1987, p. 135 a 242, III(I)*, 135–242.
- Infovini. (2025a). *Portal do Vinho Português*. <https://www.infovini.com/classic/pagina.php?codPagina=65&praga=1>

- Infovini. (2025b). *Vinhos Verdes*. <https://www.infovini.com/pagina.php?codNode=3889>
- Iowa State University. (2003). *Interpreting results of the Mehlich-3 ICP Soil Phosphorus Test*. [https://crops.extension.iastate.edu/encyclopedia/interpreting-results-mehlich-3-icp-soil-phosphorus-test?utm\\_source=chatgpt.com](https://crops.extension.iastate.edu/encyclopedia/interpreting-results-mehlich-3-icp-soil-phosphorus-test?utm_source=chatgpt.com)
- ISO - International Organization for Standardization. (1995). *ISO 10694:1995 Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis)*.
- ISO - International Organization for Standardization. (2002). *ISO 16072:2002 Soil quality — Laboratory methods for determination of microbial soil respiration*. ISO.
- ISO - International Organization for Standardization. (2021). *ISO 10390:2021 Soil, treated biowaste and sludge – Determination of pH*.
- ISO - International Organization for Standardization. (2023). *Soil quality-Effects of pollutants on earthworms Part 2: Determination of effects on reproduction of Eisenia fetida/Eisenia andrei and other earthworm species*. [www.iso.org](http://www.iso.org)
- IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, I. P. (2009). *Consumo mundial de vinho em queda*. <https://www.ivv.gov.pt/np4/2435.html?utm>
- IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, I. P. (2024). *Regiões Vitivinícolas Portugal*.
- IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, I. P. (2025a). *DENOMINAÇÕES DE ORIGEM E INDICAÇÕES GEOGRÁFICAS*. <https://www.ivv.gov.pt/np4/7734.html>
- IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, I. P. (2025b). *INFORMAÇÃO DE MERCADO - janeiro a abril 2025*.
- IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, I. P. (2025c). *INFORMAÇÃO DE MERCADO - janeiro a junho 2025*.
- IVV - Instituto da Vinha e do Vinho, I. P. (2025d). *INFORMAÇÃO DE MERCADO - janeiro a novembro 2024*.
- Karl, A., Merwin, I. A., Brown, M. G., Hervieux, R. A., & Heuvel, J. E. V. (2016). Impact of undervine management on vine growth, yield, fruit composition, and wine sensory analyses in cabernet franc. *American Journal of Enology and Viticulture*, 67(3), 269–280. <https://doi.org/10.5344/ajev.2016.15061>

- Kaye, J. P., & Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 37, Issue 1). Springer-Verlag France. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Keller M. (2010). *The Science of Grapevines*.
- Koudahe, K., Allen, S. C., & Djaman, K. (2022). Critical review of the impact of cover crops on soil properties. In *International Soil and Water Conservation Research* (Vol. 10, Issue 3, pp. 343–354). International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation and China Water and Power Press. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>
- Kucerik, J., Brtnicky, M., Mustafa, A., Hammerschmiedt, T., Kintl, A., Sobotkova, J., Alamri, S., Baltazar, T., Latal, O., Naveed, M., Malicek, O., & Holatko, J. (2024). Utilization of Diversified Cover Crops as Green Manure-Enhanced Soil Organic Carbon, Nutrient Transformation, Microbial Activity, and Maize Growth. *Agronomy*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy14092001>
- Lazcano, C., Decock, C., & Wilson, S. G. (2020). Defining and Managing for Healthy Vineyard Soils, Intersections With the Concept of Terroir. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00068>
- Maciag, B. J., Brenan, J. M., Parsons, M. B., & Kennedy, G. W. (2023). Sources of geogenic arsenic in well water associated with granitic bedrock from Nova Scotia, Canada. *Science of the Total Environment*, 887. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163943>
- Matsuda, C., Advisor, T., & Deenik, J. L. (2018). *DEVELOPING SOIL WATER RETENTION CURVES TO GUIDE IRRIGATION NEEDS FOR THE SOILS OF PIONEER FARM, WAIALUA, OAHU*.
- Mezei, I., Lukić, M., Berbakov, L., Pavković, B., & Radovanović, B. (2022). Grapevine Downy Mildew Warning System Based on NB-IoT and Energy Harvesting Technology. *Electronics (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/electronics11030356>
- Michigan State University. (2013). *Soil sampling vineyards and guidelines for interpreting the soil test results*. Soil sampling vineyards and guidelines for interpreting the soil test results

- Moura, J. A., Gonzaga, M. I. S., Dos Anjos, J. L., Rodrigues, A. C. P., Da Silva Leão, T. D., & Santos, L. C. O. (2015). Basal respiration and stratification ratio in soil cultivated with citrus and treated with organic residues in the state of Sergipe. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(2), 731–746. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n2p731>
- Nair, V. D., & Sollenberger, L. E. (2022). *Final Report for: Evaluating Soil Phosphorus Bioavailability in Florida Soils of Variable Composition FDACS Contract #: 27155 Principle Investigator*.
- Novara, A., Pisciotta, A., Minacapilli, M., Maltese, A., Capodici, F., Cerdà, A., & Gristina, L. (2018). The impact of soil erosion on soil fertility and vine vigor. A multidisciplinary approach based on field, laboratory and remote sensing approaches. *Science of the Total Environment*, 622–623, 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.272>
- O'Brien, F., Nesbitt, A., Sykes, R., & Kemp, B. (2025). Regenerative viticulture and climate change resilience. In *Oeno One* (Vol. 59, Issue 1). International Viticulture and Enology Society. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2025.59.1.8089>
- Ochoa-Hueso, R., Cantos-Villar, E., Puertas, B., Aguiar del Rio, J. F., Belda, I., Delgado-Baquerizo, M., Fernández, V., Gallardo, A., García-Morales, J. L., Garde-Cerdán, T., Gonzaga-Santesteban, L., Lazcano, C., Liberal, I. M., Serrano-Grijalva, L., Tortosa, G., & Casimiro-Soriguer, R. (2024). Nature-based strategies to regenerate the functioning and biodiversity of vineyards. In *Journal of Sustainable Agriculture and Environment* (Vol. 3, Issue 1). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/sae2.12088>
- OIV - International Organisation of Vine and Wine. (2022). *STATE OF THE WORLD VINE AND WINE SECTOR IN 2022*.
- OIV - International Organisation of Vine and Wine. (2023). *STATE OF THE WORLD VINE AND WINE SECTOR IN 2023*.
- Penn, C. J., Rutter, E. B., Arnall, D. B., Camberato, J., Williams, M., & Watkins, P. (2018). A discussion on mehlisch-3 phosphorus extraction from the perspective of governing chemical reactions and phases: Impact of soil pH. *Agriculture (Switzerland)*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture8070106>

- Pijl, A., Wang, W., Straffellini, E., & Tarolli, P. (2022). Soil and water conservation in terraced and non-terraced cultivations: an extensive comparison of 50 vineyards. *Land Degradation and Development*, 33(4), 596–610. <https://doi.org/10.1002/ldr.4170>
- Pl@ntNet. (2025). *Pl@ntNet*. <https://plantnet.org/en/>
- Quemada, M., Baranski, M., Nobel-de Lange, M. N. J., Vallejo, A., & Cooper, J. M. (2013). Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 174, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.018>
- Radicetti, E., Mancinelli, R., & Campiglia, E. (2013). Impact of managing cover crop residues on the floristic composition and species diversity of the weed community of pepper crop (*Capsicum annuum* L.). *Crop Protection*, 44, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.10.017>
- Richardson, A. E., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, S. E., Harvey, P. R., Ryan, M. H., Veneklaas, E. J., Lambers, H., Oberson, A., Culvenor, R. A., & Simpson, R. J. (2011). Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, 349(1–2), 121–156. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4>
- Richardson, A. E., & Simpson, R. J. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability. *Plant Physiology*, 156(3), 989–996. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>
- Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., & Marques, M. J. (2011). Soil and water conservation dilemmas associated with the use of green cover in steep vineyards. *Soil and Tillage Research*, 117, 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.004>
- Sakib, T. U., Nelson, N. O., Hettiarachchi, G. M., Moorberg, C. J., Nippert, J. B., & Whitaker, S. (2025). Soil phosphorus availability as affected by root exudates of cover crop species. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19102-7>
- Santos, N. (2021). *A cultura do vinho em Portugal. Pelos caminhos da vitivinicultura*.
- Scavo, A., Fontanazza, S., Restuccia, A., Pesce, G. R., Abbate, C., & Mauromicale, G. (2022). The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status

- in temperate climates. A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 42, Issue 5). Springer-Verlag Italia s.r.l. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00825-0>
- Schmidt, C. (2020). *Occurrence of Phytophthora species in soils, and functional analysis of soil microbiomes on Biolog EcoPlates-A study on commercial soils, and forest and urban soils*. <https://stud.epsilon.slu.se>
- Smit, B. , J. B. , H. W. , H. W. , A. J. L. , K. J. (2019). *Adoption of cover crops for climate change mitigation in the EU*. <https://doi.org/10.2760/638382>
- Sociedade Portuguesa de Botânica. (2025). *Flora-On*. <https://flora-on.pt/>
- Teixeira, A., Martins, V., Manso, J., Correia, S., Ferreira, A. R., Fontes, N., Graça, A., & Gerós, H. (2025). Exploring the influence of cover crops with native plant species on soil and berry microbiota in a Moscatel Galego vineyard: Implications for sustainable viticulture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109384>
- Thapa, V. R., Ghimire, R., VanLeeuwen, D., Acosta-Martínez, V., & Shukla, M. (2022). Response of soil organic matter to cover cropping in water-limited environments. *Geoderma*, 406. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115497>
- The Ohio State University. (n.d.). *Standard Operating Procedure Mehlich*.
- Tonitto, C., David, M. B., & Drinkwater, L. E. (2006). Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(1), 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.07.003>
- USDA - United States Department of Agriculture. (2014a). *Soil Electrical Conductivity Educators*. <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soils/soil-health/soil-health-educators-guide>
- USDA - United States Department of Agriculture. (2014b). *Soil PH*. <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soils/soil-health/soil-health-educators-guide>
- USDA - United States Department of Agriculture. (2014c). *Soil Respiration*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Respiration.pdf>

- USDA - United States Department of Agriculture. (2019). *Soil Bulk Density Moisture Aeration*. <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soils/soil-health/soil-health-educators-guide>
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. In *New Phytologist* (Vol. 157, Issue 3, pp. 423–447). <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Vanden Heuvel, J., & Centinari, M. (2021). Under-Vine Vegetation Mitigates the Impacts of Excessive Precipitation in Vineyards. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 12). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.713135>
- Vinhos Verdes. (2025). *Vinhos Verdes Região Demarcada desde 1908*. <https://www.vinhoverde.pt/pt/homepage>
- Visconti, F., López, R., & Olego, M. Á. (2024). The Health of Vineyard Soils: Towards a Sustainable Viticulture. In *Horticulturae* (Vol. 10, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020154>
- Warren Raffa, D., Antichi, D., Carlesi, S., Frascioni, C., Marini, S., Priori, S., & Bàrberi, P. (2021). Groundcover mulching in mediterranean vineyards improves soil chemical, physical and biological health already in the short term. *Agronomy*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy11040787>
- Wines of Portugal. (2025). *Wines of Portugal*. <https://winesofportugal.com/pt/descobrir/regioes-vitivincolas/vinho-verde/>
- Zak, J. C., Willig, M. R., Moorhead, D. L., & Wildman, H. G. (1994). FUNCTIONAL DIVERSITY OF MICROBIAL COMMUNITIES: A QUANTITATIVE APPROACH. In *Soil Biol. Biochem* (Vol. 26, Issue 9).
- Zhang, H., Kariuki, S., Schroder, J. L., & Payton, M. E. (2009). *Interlaboratory Validation of the Mehlich 3 Method for Extraction of Plant-Available Phosphorus*.
- Zhao, X., He, C., Liu, W. S., Liu, W. X., Liu, Q. Y., Bai, W., Li, L. J., Lal, R., & Zhang, H. L. (2022). Responses of soil pH to no-till and the factors affecting it: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 28(1), 154–166. <https://doi.org/10.1111/gcb.15930>

## Anexos

Tabela 1 - Tabela resumo referente aos resultados dos parâmetros físico-químicos determinados na primeira campanha de amostragem (outono), para cada tratamento e respetivas réplicas.

|             |                |      | Parâmetros |        |             |             |              |                       |        |        |
|-------------|----------------|------|------------|--------|-------------|-------------|--------------|-----------------------|--------|--------|
|             |                |      | WHC (%)    | MO (%) | P (mg P/Kg) | C Total (%) | Humidade (%) | Condutividade (µS/cm) | pH H2O | pH KCl |
| Tratamentos | Proterra       | M6.1 | 52,19      | 7,12   | 123,57      | 1,67        | 15,55        | 50,47                 | 5,43   | 4,73   |
|             |                | M6.2 | 53,87      | 5,92   | 110,14      | 1,39        | 16,52        | 50,40                 | 5,57   | 4,75   |
|             |                | M6.3 | 57,78      | 6,95   | 97,25       | 1,84        | 16,13        | 95,57                 | 5,51   | 4,87   |
|             |                | M6.4 | 56,74      | 6,79   | 108,49      | 1,90        | 16,96        | 155,03                | 5,50   | 4,93   |
|             |                | M5.1 | 49,36      | 8,21   | 125,06      | 1,87        | 17,63        | 105,13                | 5,48   | 4,73   |
|             |                | M5.2 | 54,70      | 7,13   | 111,41      | 1,53        | 16,57        | 48,00                 | 5,53   | 4,66   |
|             |                | M5.3 | 52,58      | 7,80   | 102,69      | 1,87        | 17,26        | 121,17                | 5,46   | 4,80   |
|             |                | M5.4 | 58,91      | 7,74   | 98,68       | 1,55        | 16,86        | 69,50                 | 5,54   | 4,76   |
|             |                | M4.1 | 48,44      | 6,16   | 135,07      | 1,55        | 17,28        | 261,07                | 5,14   | 4,48   |
|             |                | M4.2 | 55,94      | 7,16   | 178,28      | 1,71        | 16,87        | 63,13                 | 5,54   | 4,65   |
|             |                | M4.3 | 51,95      | 7,05   | 120,53      | 2,19        | 17,72        | 166,23                | 5,42   | 4,76   |
|             |                | M4.4 | 59,74      | 6,13   | 125,32      | 1,37        | 16,56        | 141,20                | 5,25   | 4,65   |
|             | Ferticover     | M3.1 | 51,92      | 7,11   | 92,32       | 1,81        | 17,10        | 36,03                 | 5,33   | 4,65   |
|             |                | M3.2 | 54,87      | 6,71   | 99,16       | 1,48        | 17,45        | 58,67                 | 5,46   | 4,69   |
|             |                | M3.3 | 59,17      | 6,76   | 112,96      | 2,18        | 17,92        | 34,00                 | 5,58   | 4,74   |
|             |                | M3.4 | 60,29      | 7,32   | 81,63       | 1,75        | 17,34        | 55,47                 | 5,45   | 4,68   |
|             |                | M2.1 | 49,14      | 6,11   | 101,86      | 1,72        | 16,51        | 55,97                 | 5,33   | 4,55   |
|             |                | M2.2 | 51,64      | 6,94   | 84,94       | 1,57        | 21,59        | 54,83                 | 5,51   | 4,65   |
|             |                | M2.3 | 52,34      | 6,72   | 124,56      | 1,62        | 16,57        | 31,42                 | 5,41   | 4,62   |
|             |                | M1.1 | 41,57      | 5,89   | 125,28      | 1,20        | 15,36        | 103,27                | 5,12   | 4,48   |
|             |                | M1.2 | 50,76      | 7,54   | 108,88      | 1,67        | 17,02        | 42,97                 | 5,51   | 4,71   |
|             |                | M1.3 | 58,00      | 7,35   | 68,54       | 2,07        | 17,60        | 36,10                 | 5,55   | 4,73   |
|             |                | M1.4 | 54,27      | 6,83   | 123,72      | 1,79        | 17,28        | 62,70                 | 5,24   | 4,67   |
|             | Mobilizado     | MO.1 | 52,21      | 7,96   | 94,32       | 1,77        | 17,07        | 50,53                 | 5,64   | 4,71   |
|             |                | MO.2 | 50,09      | 6,73   | 99,47       | 1,57        | 17,12        | 37,53                 | 5,69   | 4,72   |
|             |                | MO.3 | 56,92      | 6,28   | 110,80      | 1,68        | 16,98        | 52,37                 | 5,65   | 4,86   |
|             |                | MO.4 | 56,66      | 7,58   | 125,50      | 1,62        | 17,49        | 57,17                 | 5,67   | 4,99   |
|             |                | MO.5 | 55,12      | 6,11   | 116,97      | 1,75        | 17,04        | 90,07                 | 5,51   | 4,86   |
|             |                | MO.6 | 57,80      | 6,94   | 124,98      | 1,44        | 16,50        | 63,03                 | 5,45   | 4,74   |
|             | Não Mobilizado | NM*1 | 49,35      | 6,13   | 122,41      | 1,25        | 17,57        | 118,73                | 4,90   | 4,40   |
|             |                | NM.2 | 55,16      | 7,19   | 109,09      | 1,88        | 18,60        | 182,90                | 5,56   | 4,91   |
|             |                | NM.3 | 51,51      | 7,52   | 101,86      | 1,88        | 17,18        | 50,63                 | 5,52   | 4,66   |
|             |                | NM.4 | 55,91      | 6,91   | 110,54      | 1,61        | 17,21        | 58,13                 | 5,72   | 4,80   |
|             |                | NM.5 | 56,31      | 7,64   | 87,62       | 1,91        | 18,73        | 72,67                 | 5,68   | 4,82   |
|             |                | NM.6 | 58,94      | 8,40   | 78,31       | 2,16        | 17,87        | 75,90                 | 5,64   | 4,91   |
|             |                | NM.7 | 55,96      | 6,54   | 103,36      | 1,48        | 16,90        | 74,10                 | 5,62   | 4,86   |
|             |                | NM.8 | 56,81      | 7,16   | 116,80      | 1,44        | 17,26        | 146,70                | 5,46   | 4,79   |

Tabela 2 - Tabela resumo referente aos resultados dos parâmetros físico-químicos determinados na segunda campanha de amostragem (primavera), para cada tratamento e respetivas réplica.

|             |                |      | Parâmetros  |             |              |                       |        |        |                    |
|-------------|----------------|------|-------------|-------------|--------------|-----------------------|--------|--------|--------------------|
|             |                |      | P (mg P/Kg) | C Total (%) | Humidade (%) | Condutividade (µS/cm) | pH H2O | pH KCl | Densidade (mg/cm3) |
| Tratamentos | Proterra       | M6.1 | 114,45      | 1,17        | 19,16        | 14,01                 | 6,12   | 4,73   | 1,01               |
|             |                | M6.2 | 121,42      | 1,40        | 18,25        | 30,83                 | 5,97   | 4,80   | 1,03               |
|             |                | M6.3 | 89,51       | 1,57        | 19,18        | 32,46                 | 5,98   | 4,81   | 1,00               |
|             |                | M6.4 | 62,80       | 2,02        | 20,89        | 33,07                 | 5,93   | 4,79   | 0,95               |
|             |                | M5.1 | 140,85      | 1,47        | 17,88        | 34,13                 | 5,86   | 4,69   | 0,98               |
|             |                | M5.2 | 126,96      | 1,33        | 18,80        | 21,91                 | 5,93   | 4,80   | 1,06               |
|             |                | M5.3 | 136,28      | 1,41        | 16,78        | 32,40                 | 5,90   | 4,92   | 0,96               |
|             |                | M5.4 | 110,35      | 1,11        | 18,16        | 22,02                 | 5,76   | 4,72   | 0,97               |
|             |                | M4.1 | 153,70      | 1,39        | 17,83        | 34,50                 | 5,57   | 4,41   | 1,02               |
|             |                | M4.2 | 113,49      | 1,43        | 19,07        | 30,10                 | 5,70   | 4,58   | 1,11               |
|             |                | M4.3 | 108,78      | 1,69        | 18,74        | 45,50                 | 5,61   | 4,77   | 0,97               |
|             |                | M4.4 | 108,96      | 1,69        | 18,55        | 42,53                 | 5,65   | 4,67   | 0,96               |
|             | Ferticover     | M3.1 | 114,03      | 1,52        | 19,70        | 39,90                 | 5,61   | 4,61   | 0,95               |
|             |                | M3.2 | 95,75       | 1,50        | 18,93        | 43,87                 | 5,63   | 4,73   | 0,98               |
|             |                | M3.3 | 103,70      | 1,74        | 20,31        | 43,27                 | 5,71   | 4,74   | 0,88               |
|             |                | M3.4 | 125,35      | 1,52        | 18,91        | 44,93                 | 5,65   | 4,81   | 0,64               |
|             |                | M2.1 | 117,85      | 1,57        | 19,28        | 43,13                 | 5,53   | 4,65   | 0,99               |
|             |                | M2.2 | 120,38      | 1,37        | 17,34        | 57,10                 | 5,59   | 4,64   | 0,89               |
|             |                | M2.3 | 83,08       | 1,69        | 19,34        | 40,40                 | 5,73   | 4,75   | 0,99               |
|             |                | M1.1 | 141,10      | 0,99        | 18,67        | 41,70                 | 5,67   | 4,65   | 0,97               |
|             |                | M1.2 | 97,78       | 1,67        | 19,13        | 36,97                 | 5,75   | 4,56   | 0,88               |
|             |                | M1.3 | 128,37      | 1,66        | 19,52        | 50,30                 | 5,79   | 4,79   | 0,85               |
|             |                | M1.4 | 134,63      | 1,69        | 19,32        | 68,40                 | 5,81   | 4,89   | 0,94               |
|             | Mobilizado     | MO.1 | 75,39       | 1,37        | 21,91        | 22,96                 | 6,30   | 4,62   | 1,10               |
|             |                | MO.2 | 153,90      | 1,41        | 18,12        | 29,04                 | 6,63   | 4,81   | 1,02               |
|             |                | MO.3 | 110,84      | 1,54        | 18,84        | 27,96                 | 6,07   | 4,78   | 1,02               |
|             |                | MO.4 | 90,29       | 2,01        | 18,47        | 33,97                 | 6,30   | 4,94   | 0,97               |
|             |                | MO.5 | 126,21      | 1,64        | 18,30        | 38,43                 | 6,44   | 4,93   | 0,95               |
|             |                | MO.6 | 115,35      | 1,20        | 18,81        | 35,73                 | 6,17   | 4,76   | 0,92               |
|             | Não Mobilizado | NM*1 | 125,31      | 1,31        | 18,75        | 42,47                 | 5,70   | 4,41   | 0,96               |
|             |                | NM.2 | 124,34      | 1,61        | 19,68        | 33,00                 | 5,62   | 4,71   | 1,01               |
|             |                | NM.3 | 98,43       | 1,22        | 18,61        | 31,41                 | 5,69   | 4,74   | 0,99               |
|             |                | NM.4 | 103,44      | 1,41        | 18,99        | 32,63                 | 5,74   | 4,72   | 0,98               |
|             |                | NM.5 | 89,08       | 1,40        | 18,50        | 26,36                 | 5,79   | 4,85   | 0,98               |
|             |                | NM.6 | 134,74      | 1,46        | 17,79        | 21,07                 | 5,79   | 4,82   | 0,92               |
|             |                | NM.7 | 126,85      | 1,54        | 18,43        | 30,76                 | 5,74   | 4,88   | 0,91               |
|             |                | NM.8 | 119,06      | 1,31        | 18,07        | 33,10                 | 5,83   | 4,80   | 1,14               |

Tabela 3 - Tabela com os valores de p e sua classificação, para as diferenças significativas entre tratamentos (nas respetivas estações) e campanhas de amostragem, para cada parâmetro determinado onde se verificaram diferenças significativas.

| Valores de p |                            |                          |           | Classificação das diferenças significativas |    | Comparação |          | Parâmetros  |                |              |                       |        |
|--------------|----------------------------|--------------------------|-----------|---------------------------------------------|----|------------|----------|-------------|----------------|--------------|-----------------------|--------|
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          | P (mg P/Kg) | C Orgânico (%) | Humidade (%) | Condutividade (µS/cm) | pH H2O |
| p < 0.05     | Significativo              | Tratamento vs Tratamento | Outono    | M4 vs M3                                    |    |            |          | M4 vs M6    |                |              |                       |        |
|              |                            |                          |           | M4 vs NM                                    |    |            |          | M4 vs M5    |                |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          | M4 vs NM    |                |              |                       |        |
|              |                            |                          | Primavera |                                             |    |            |          |             | M6 vs M2       |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          |             | M6 vs M3       |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          |             | M6 vs MO       |              |                       |        |
|              |                            | Campanha vs Campanha     |           |                                             |    |            |          |             | M3             |              |                       |        |
| p < 0.01     | Muito significativo        | Tratamento vs Tratamento | Outono    |                                             |    |            |          |             |                |              |                       |        |
|              |                            |                          | Primavera |                                             |    |            |          |             | M6 vs M4       |              |                       |        |
|              |                            | Campanha vs Campanha     |           |                                             | M5 | M3         | M6       | M4          |                |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             | NM | M1         | M5       | NM          |                |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    | MO         |          |             |                |              |                       |        |
| p < 0.001    | Altamente significativo    | Tratamento vs Tratamento | Outono    |                                             |    |            |          | M4 vs M2    |                |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          | M4 vs M1    |                |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            | M4 vs MO |             |                |              |                       |        |
|              |                            | Primavera                |           |                                             |    |            |          | M5 vs MO    |                |              |                       |        |
|              |                            | Campanha vs Campanha     |           |                                             |    | M6         |          |             | M5             |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    | M1         |          |             |                |              |                       |        |
| p < 0.0001   | Extremamente significativo | Tratamento vs Tratamento | Outono    |                                             |    |            |          | M4 vs M3    |                |              |                       |        |
|              |                            |                          | Primavera |                                             |    |            |          |             | M4 vs MO       |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          |             | M3 vs MO       |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          |             | M2 vs MO       |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          |             | M1 vs MO       |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            |          |             | NM vs MO       |              |                       |        |
|              |                            | Campanha vs Campanha     |           |                                             |    |            |          | M4          | M6             |              |                       |        |
|              |                            |                          |           |                                             |    |            | NM       | MO          |                |              |                       |        |