

**USO DE TECNOSSOLOS NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS  
GERIDAS COM FOGO CONTROLADO NA MONTANHA  
MEDITERRÂNEA: EFEITOS EM PROPRIEDADES FÍSICAS  
E QUÍMICAS DO SOLO**

**Beatriz Leão Ferraz Alves**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança  
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no  
âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica do  
Paraná – campus Campo Mourão*

Orientado por

**Professora Doutora Felícia Maria da Silva  
Professor Doutor Tomás D’Aquino Rosa de Figueiredo  
Professora Doutora Cristiane Kreutz**

**Bragança  
2024**

**BEATRIZ LEÃO FERRAZ ALVES**

**USO DE TECNOSSOLOS NA CONSERVAÇÃO DE ÁREAS  
GERIDAS COM FOGO CONTROLADO NA MONTANHA  
MEDITERRÂNEA: EFEITOS EM PROPRIEDADES FÍSICAS  
E QUÍMICAS DO SOLO**

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica do Paraná – campus Campo Mourão.

Bragança

Instituto Politécnico de Bragança – IPB

2024

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe e irmã, que sempre estiveram presentes e me auxiliando em tudo para que meu caminho fosse mais leve.

Ao meu pai, que mesmo não estando nesse plano, sempre esteve presente.

A toda minha família, e a todos que ajudaram na minha trajetória até aqui, principalmente aos meus avós paternos.

A minha orientadora Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca por toda orientação e tempo dedicado para a conclusão deste trabalho. Agradeço também os meus coorientadores Professor Doutor Tomás D’Aquino Rosa de Figueiredo e Professora Doutora Cristiane Kreutz por toda a orientação para a elaboração do trabalho.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Campo Mourão, por me proporcionar essa oportunidade acadêmica, e ao Instituto Politécnico de Bragança pelo acolhimento.

Aos meus amigos. Aos amigos de vida, que mesmo estando a um continente de distância, ainda conseguiram me apoiar, me motivar e se fazerem presentes no meu dia a dia. Aos amigos de Portugal, por todo o tempo que passamos juntos, principalmente os cafés da tarde, conversas, fofocas e desabafos.

Aos meus amigos de laboratório, que tiveram papel crucial na elaboração do presente estudo.

Por fim, agradeço a todos que, independentemente da forma, contribuíram para o meu trabalho e comigo de uma forma geral.

Muito obrigada!

## RESUMO

O solo é um recurso essencial para a vida, mas enfrenta degradação crescente devido ao seu uso antrópico inadequado e aos incêndios florestais frequentes na Europa Mediterrânea. A aplicação de Tecnossolos, que são solos modificados ou artificialmente criados, surge como uma solução para a recuperação de áreas degradadas, permitindo restaurar as funções ecológicas e produtivas dos solos.

Neste estudo, procedeu-se à aplicação de Tecnossolos na superfície do solo, como solução inovadora para a recuperação de áreas ardidas por fogo controlado no Parque Natural de Montesinho, NE Portugal. Estudaram-se os efeitos da aplicação do Tecnossolo, para um período de 27 meses, em propriedades físicas (permeabilidade, densidade, capacidade de campo, capacidade máxima para a água, estabilidade dos agregados) e químicas do solo (matéria orgânica, azoto, fósforo e potássio extraíveis, pH). Para esse efeito, foram estabelecidas duas áreas de amostragem, com e sem aplicação de Tecnossolo. Em cada área de amostragem definiu-se um transecto e em cada transecto selecionaram-se quatro pontos onde ocorreu à coleta de amostras de solo nas profundidades 0-3, 3-6, 6-10 e 10-20 cm. Também foram coletadas amostras de Tecnossolo (espessura média de 5 cm).

Os resultados indicam que a aplicação do Tecnossolo melhorou significativamente algumas propriedades físicas e químicas do solo, favorecendo a retenção de água e a redução da acidez do solo. O teor de matéria orgânica não sofreu alterações significativas e os níveis de fósforo e potássio extraíveis foram maiores nas áreas tratadas com Tecnossolo, o que contribuiu para uma maior fertilidade e capacidade de suporte das plantas. Observou-se também uma melhora na estrutura do solo, com diminuição da densidade aparente e aumento da porosidade, permitindo melhor infiltração de água e aeração. De maneira geral, a aplicação do Tecnossolo se mostrou eficaz na recuperação dos impactos produzidos pelo fogo no solo.

**Palavras Chave:** Parque Natural de Montesinho, fogo controlado, Tecnossolos; propriedades do solo; recuperação de áreas ardidas.

## **ABSTRACT**

Soil is an essential resource for life, but it faces degradation due to its inappropriate anthropogenic use and frequent forest fires in Mediterranean Europe. The application of Technosols, which are either modified or artificially created soils, appears as a solution for the recovery of degraded areas, allowing the ecological and productive functions of soils.

In this study, Technosols were applied to the soil surface as an innovative solution for the recovery of burned areas by controlled fire in the Montesinho Natural Park, NE Portugal. The effects of applying the Technosols over a period of 27 months on the soil's physical (permeability, density, field capacity, maximum water capacity, aggregate stability) and chemical (organic matter, nitrogen, extractable phosphorus, and potassium, pH) properties were studied. For this purpose, two sampling areas were established, with and without the application of Technosols. One transect was defined in each sampling area, and four points were selected in each transect where soil samples were taken at depths of 0-3, 3-6, 6-10, and 10-20 cm. Samples of Technosols were also collected and applied to the surface (average thickness of 5 cm).

The results indicate that the application of Technosols significantly improved some of the soil's physical and chemical properties, favoring water retention and reducing soil acidity. The organic matter content and levels of extractable phosphorus and potassium were higher in the areas treated with Technosols, which contributed to greater fertility and plant support capacity. There was also an improvement in soil structure, with a reduction in bulk density and an increase in porosity, allowing for better water infiltration and aeration. Overall, the application of Technosols proved to be effective in recovering from the impacts of fire on the soil.

**Keywords:** Montesinho Natural Park, controlled fire, Technosols, soil properties, recovery of burnt areas.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	III
RESUMO .....	IV
ABSTRACT .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE QUADROS .....	X
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1. <i>Solos</i> .....	14
2.1.1. Formação dos solos e sua importância .....	14
2.1.2. Tecnosolos .....	15
2.1.3. Propriedades químicas do solo .....	17
2.1.4. Propriedades físicas do solo .....	18
2.1.5. Estabilidade dos agregados do solo .....	19
2.2. <i>Fogo</i> .....	20
2.2.1. Ocorrência de incêndios em Portugal .....	21
2.2.2. Impactos do fogo nas propriedades do solo .....	21
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
3.1. <i>Caracterização da área de estudo</i> .....	23
3.2. <i>Caracterização climática</i> .....	25
3.3. <i>Caracterização dos solos</i> .....	26
3.4. <i>Vegetação</i> .....	27
3.5. <i>Áreas de amostragem</i> .....	27
3.6. <i>Coleta e processamento das amostras de solo</i> .....	28
3.7. <i>Avaliação de propriedades químicas do solo</i> .....	29
3.7.1. Matéria orgânica .....	29
3.7.2. Azoto total .....	30
3.7.3. Valores de pH .....	30
3.7.4. Fósforo e potássio extraíveis .....	31
3.8. <i>Avaliação de propriedades físicas do solo</i> .....	31
3.8.1. Densidade aparente .....	31
3.8.2. Permeabilidade .....	32
3.8.3. Capacidade máxima para água e capacidade de campo .....	35
3.8.4. Porosidade total .....	35
3.8.5. Microporosidade e macroporosidade .....	35
3.8.6. Estabilidade dos agregados do solo .....	36
3.9. <i>Análises Estatísticas</i> .....	39
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
1.1. <i>Propriedades químicas do solo</i> .....	40
4.1.1. Reação do solo .....	40
4.1.2. Matéria orgânica do solo .....	41
4.1.3. Azoto total .....	43

4.1.4.	Fosforo extraível .....	44
4.1.5.	Potássio extraível.....	45
4.2.	<i>Propriedades físicas do solo</i> .....	46
4.2.1.	Estabilidade dos agregados do solo .....	46
4.2.2.	Densidade aparente .....	48
4.2.3.	Elementos grosseiros .....	49
4.2.4.	Porosidade.....	50
4.2.4.1.	Microporosidade.....	52
4.2.4.2.	Macroporosidade.....	53
4.2.5.	Permeabilidade .....	54
4.2.6.	Capacidade máxima para água e capacidade de campo .....	56
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>58</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização geográfica da área de estudo. ....	23
<b>Figura 2</b> - Aplicação do Tecnossolo na área de estudo. ....	24
<b>Figura 3</b> - Espalhamento do Tecnossolo na parcela de estudo. ....	25
<b>Figura 4</b> - Média de distribuição mensal das temperaturas máximas e mínimas no aeródromo de Bragança nos anos de 2022 e 2023. ....	26
<b>Figura 5</b> - Média de distribuição mensal da precipitação no aeródromo de Bragança nos anos de 2022 e 2023. ....	26
<b>Figura 6</b> - Localização dos pontos de coleta de amostras de solo. ....	28
<b>Figura 7</b> - Anéis com as amostras de solo encaixados no permeâmetro. ....	33
<b>Figura 8</b> - Estabilizador de agregados. ....	37
<b>Figura 9</b> - Valores do pH (H <sub>2</sub> O) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	40
<b>Figura 10</b> - Valores de pH (KCl) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	41
<b>Figura 11</b> - Teor de matéria orgânica do solo (%) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	42
<b>Figura 12</b> - Concentração de azoto total (g kg <sup>-1</sup> ) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	44
<b>Figura 13</b> - Estabilidade dos agregados da classe 0,25 mm (%). em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	47
<b>Figura 14</b> - Estabilidade dos agregados da classe 0,4 mm (%) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	48
<b>Figura 15</b> - Densidade aparente do solo (Dap) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	49
<b>Figura 16</b> - Elementos grosseiros do solo (%) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	50
<b>Figura 17</b> - Porosidade total do solo (%) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	51
<b>Figura 18</b> - Microporosidade (%) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	53
<b>Figura 19</b> - Macroporosidade (%) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	54
<b>Figura 20</b> - Permeabilidade inicial do solo (K <sub>i</sub> ) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). ....	55

<b>Figura 21</b> - Permeabilidade final. do solo (Kf) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). .....	55
<b>Figura 22</b> - Capacidade máxima para a água (CMA) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). .....	56
<b>Figura 23</b> - Capacidade de campo (CC) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). .....	57

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Indicação do teor de matéria orgânica de horizontes do solo (Santos, 2015). .....	30
<b>Quadro 2</b> - Intervalos de pH (H <sub>2</sub> O) e classificação do solo quanto à reação (Costa, 2018). .....	31
<b>Quadro 3</b> - Classificação dos solos quanto aos teores de fósforo e potássio extraíveis (Santos, 2015). .....	31
<b>Quadro 4</b> - Classificação da permeabilidade do solo (SCS/USDA). .....	34
<b>Quadro 5</b> - Fósforo extraível do solo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). .....	45
<b>Quadro 6</b> - Potássio extraível do solo (K <sub>2</sub> O) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). .....	46

## 1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural fundamental para a vida e a sustentabilidade do planeta, desempenhando múltiplas funções cruciais. Além de ser indispensável para a produção de alimentos, ele contribui ativamente para sustentar a vida em diferentes aspectos. Entre suas principais funções, destacam-se a regulação do ciclo hidrológico, a mediação dos ciclos biogeoquímicos, o sequestro de carbono, a manutenção da biodiversidade e a garantia de estabilidade de ecossistemas. Dessa forma, o solo atua como um componente-chave nos processos ecológicos que sustentam a saúde ambiental e o bem-estar humano.

Andreoli et al. (2014) referem que, para além de outras atividades humanas, o solo é indispensável para a produção de alimentos de forma geral, visto que além de atuar fornecendo suporte às plantas, fornece elementos essenciais para seu desenvolvimento. Porém, o solo é um recurso natural escasso e considerado não renovável na escala de tempo da existência humana. Assim, é válido ressaltar que, a nível global, a percentagem de área cultivável tem vindo a diminuir à medida que a população mundial cresce.

O solo, parte móvel da superfície da crosta terrestre, constitui a base dos ecossistemas terrestres e é imprescindível para a vida na Terra. Define-se como sendo um recurso natural dinâmico, formado a partir de processos físicos, químicos e biológicos de alteração das rochas, sofrendo influência do clima, relevo e organismos, ao longo do tempo (Porta et al., 2003; Costa, 2018).

O solo sofre degradação devido à sua utilização de forma inapropriada, principalmente pelas atividades humanas. Isso acarreta graves problemas referente ao equilíbrio de ecossistemas dependentes do solo, como perda de qualidade ambiental, reduzindo a capacidade dos sistemas naturais de sustentar a vida, especialmente nos ambientes mais intensamente modificados pela ação humana, como os sistemas agrícolas e os espaços urbanos. Nesses contextos, a intervenção humana frequentemente intensifica os processos de degradação, resultando em efeitos prejudiciais que afetam tanto o meio ambiente quanto a qualidade de vida das populações que dependem desses recursos. (Teixeira & Vieira, 2011). A degradação dos solos constitui uma ameaça premente para o clima e a sobrevivência da espécie humana. Em 2050, estima-se que mil milhões de pessoas serão refugiadas da desertificação do solo (Cherlet et al., 2018). Com isso, o homem tem um papel fundamental na gestão sustentável dos solos e, consequentemente na conservação do solo e no combate à desertificação, permitindo preservar as funções

vitais do solo e tudo o que ocorre acima dele (Magalhães, 2015).

Além da má gestão e uso do solo, uma das maiores dificuldades da sociedade portuguesa nas últimas décadas são os incêndios florestais. Segundo Pereira (2018), os efeitos dos incêndios florestais no funcionamento dos solos, representam uma linha de pesquisa que recebe especial atenção no mundo todo. O manejo dos solos impactados por incêndios é considerado um dos principais desafios enfrentados pela Europa Mediterrânea, particularmente Portugal (Freitas, 2018). Com isso, uma técnica que vem sendo mundialmente difundida é o uso de Tecnosolos para recuperação de áreas degradadas, assim, surge uma linha de estudo pioneira com aplicação de Tecnosolos para recuperação de áreas ardidas.

Segundo dados do ICNF, dentre as causas de ocorrência dos incêndios, a maior percentagem é devida a ações antrópicas, como queimadas para gestão de pasto, sobrantes florestais ou agrícolas, queimas de lixo, realização de fogueiras e até incendiarismo. Assim, na sequência do aumento considerável da disponibilidade de combustível vegetal, tem-se vindo a utilizar diversas técnicas de gestão da vegetação com o intuito de reduzir o risco de incêndio. Entre estas técnicas, a mais comumente utilizada é o fogo controlado devido à rapidez com que é executada, permitindo gerir extensas áreas em curtos períodos de tempo, e aos baixos custos associados (Castro et al., 2010; Pereira & Giglio, 2016).

A técnica do fogo controlado envolve a aplicação intencional e planejada de fogo para reduzir parte da carga de combustível vegetal, especialmente os materiais mais inflamáveis, como espécies herbáceas e arbustivas que queimam com facilidade. Em contraste, nos incêndios florestais, as chamas se propagam sem controle, seguindo as condições climáticas, topográficas e a disponibilidade de material combustível, geralmente liberando grandes quantidades de energia e atingindo temperaturas elevadas. (Meira & Meixedo, 2010; Redin et. al., 2011). O fogo controlado, quando realizado em condições adequadas de clima e meteorologia, tem sido desenvolvido como ferramenta de gestão dos combustíveis, contribuindo para que se olhe para o fogo não apenas como uma fatalidade (Meira & Meixedo, 2010; Fonseca et al., 2022).

Apesar dos benefícios do fogo controlado, é crucial conhecer os efeitos produzidos nas propriedades do solo e conhecer também os efeitos de condicionadores do solo utilizados como técnicas de conservação do solo pós-fogo. Neste contexto, o presente

estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e químicas do solo, na sequência da aplicação de Tecnosolos, como medida de conservação do solo, em áreas geridas com fogo controlado no Parque Natural de Montesinho, NE Portugal.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Solos**

Segundo Brady & Weil (2010), os solos desempenham seis funções ecológicas amplas: atuam como meio para o crescimento da vegetação, regulam o fornecimento de água, alteram a atmosfera, realizam a ciclagem de matérias-primas e resíduos, fornecem habitat para diversos organismos, e ainda servem como suporte de engenharia para estruturas construídas pelo homem. Assim, pode-se considerar que solo é, portanto, um importante ecossistema por si só.

Entretanto, devido às mudanças climáticas e à intensa atividade humana nos dias atuais, os solos sofrem diretamente com a degradação, seja com desmatamentos, agricultura inadequada, uso intensivo de maquinários, sobrepastoreio, queimadas, entre outras causas. Segundo dados da FAO (2023), 33% dos solos já se encontram em níveis de degradação, e pode levar até mil anos para formar apenas 2 a 3 cm de solo. Ainda segundo a FAO (2023), há mais organismos vivos em uma colher de sopa de solo do que pessoas na Terra. Em relação às suas características e grau de evolução, existem diversos tipos de solo como Leptosolos, Cambissolos, Alissolos, Luvisolos, Fluvisolos, Ferralsolos, Arenossolos, Antrossolos, Tecnossolos, entre outros.

Os solos predominantes no Nordeste de Portugal e na área de estudo são os Leptosolos, caracterizados como solos delgados, com espessura menor ou igual a 30 cm, apresentando elevadas quantidades de elementos grosseiros e teor reduzido de matéria orgânica. Segundo Hasse (2023), esses solos são vulneráveis à erosão, secagem ou alagamento, dependendo do clima e da topografia da região onde se encontram.

#### **2.1.1. Formação dos solos e sua importância**

O solo é formado por uma camada de material não consolidado, de natureza mineral e orgânica, abrangendo a superfície terrestre e, representa o substrato para a vida dos ecossistemas (Magalhães, 2015). Define-se como sendo um recurso natural dinâmico, formado a partir de processos físicos, químicos e biológicos de alteração das rochas, com influência do clima, relevo e organismos, ao longo do tempo (Porta et al., 2003; Costa, 2018).

Segundo Lima & Lima (2007), o solo é formado pela interação conjunta e contínua

de agentes como o clima e os organismos, sendo que estes influenciam o material inicial (geralmente rochoso), presente em uma área específica ou em configuração de relevo, ao longo de um intervalo de tempo. O material de origem, clima, seres vivos, relevo e tempo são conhecidos como fatores de formação do solo, sendo que eles integram o ambiente natural e operam de maneira interligada. Já no estudo de Pereira et al. (2019) é apontado que a combinação dos fatores responsáveis pela formação do solo resulta em processos pedogenéticos, os quais podem ser classificados em quatro principais categorias: transformação, translocação, adição e remoção. A intensidade com que cada um desses processos ocorre varia conforme as características do ambiente, o que explica a diversidade de tipos de solo encontrados em uma mesma paisagem.

Pode-se dizer que o solo é composto por quatro componentes existindo em diferentes porcentagens, que interagem entre si, sendo eles a água, o ar, a matéria orgânica e a matéria mineral, sendo eles os responsáveis por determinar a natureza do solo. Segundo Coelho et al. (2013), solos bons são aqueles que contêm conteúdos similares de água e ar, ocupando aproximadamente metade de seu volume. Os valores encontrados na literatura indicam que o solo é composto por aproximadamente 45% de matéria mineral, 5% de matéria orgânica, e entre 20 a 30% de ar e 20 a 30% de água. Dessa forma, em grande parte das situações, o solo é composto predominantemente por material mineral sólida, ao qual se combina matéria orgânica até uma profundidade variável. No entanto, pode apresentar uma quase ausência de matéria orgânica ou, inversamente, ser constituído majoritariamente por esta, com uma quantidade mínima de material mineral.

Conhecer os diferentes tipos de solo é essencial, visto que cada tipo de solo possui características únicas que influenciam na retenção de água, na fertilidade, resistência e estabilidade do solo. Entender essas características possibilita a utilização de práticas culturais mais eficientes e sustentáveis, seja na escolha de culturas agrícolas adequadas, no planejamento de construções seguras ou na conservação de ecossistemas naturais.

### **2.1.2. Tecnossolos**

Os Tecnossolos são solos profundamente alterados pela ação humana, presentes em áreas onde houve a criação de solos artificiais, impermeabilização de solos naturais ou remoção de material de camadas mais profundas. Esse tipo de solo se distingue dos solos naturais em termos de propriedades físicas, químicas e biológicas, e podem ser encontrados em ambientes urbanos, industriais, agrícolas e de mineração. Têm uma

importância crescente devido à urbanização e industrialização, e sua gestão é crucial para garantir a qualidade ambiental e a sustentabilidade das áreas afetadas por atividades humanas (IUSS, 2007).

Os Tecnossolos são solos com grande influência de matérias artificiais, que condicionam significativamente suas propriedades. Sua origem está relacionada a uma ampla diversidade de materiais criados ou modificados por atividades humanas, ou ainda à exposição de materiais que normalmente não estariam presentes na superfície terrestre. Podem ser criados pela adição de materiais orgânicos e inorgânicos, incluindo resíduos de construção civil, resíduos industriais, resíduos orgânicos (domésticos, agrícolas, florestais), entre outros. Isso pode contribuir para a reciclagem e reutilização de materiais, que de outra forma seriam, em grande parte, depositados em aterros sanitários (redução do tempo de vida dos aterros), contribuindo assim para reduzir o impacto ambiental desses resíduos (Macías-Vasquéz, F. & Macías-García F., 2021).

Dessa forma, são solos fortemente influenciados por materiais construídos pela ação humana. Em si, os termos Antrossolos e Tecnossolos compreendem solos de mesma base de formação. Solos antropogênicos são solos que possuem qualquer alteração física, química e ou morfológica significativa em relação aos solos que sejam provenientes das ações humanas, distinguindo-se essas formações pedológicas alteradas dos solos de formação natural, onde os processos pedogenéticos já estejam presentes (Teixeira et. al., 2022).

Neste sentido, os Tecnossolos constituem uma tecnologia inovadora baseada em processos naturais e na economia circular e, oferecem serviços ecossistêmicos, como suporte à biodiversidade, filtragem de água, e sequestro de carbono, dependendo da forma como são geridos e das condições locais, visto que esse tipo de solo resulta da ação antrópica, ele pode ser criado com características físicas e químicas específicas para a recuperação de determinada área. Esta estratégia tem dois pontos positivos: a reutilização e revalorização de resíduos e a possibilidade de revegetação de áreas severamente degradadas (Lopes, 2020).

Observa-se um uso crescente de Tecnossolos na remediação e recuperação de áreas degradadas, especialmente em ambientes urbanos, industriais e de áreas mineiras (IUSS, 2007, Royer et al., 2021; Macías-Vasquéz, F. & Macías-García F., 2021). A aplicação de

Tecnossolos depende das características específicas do local, dos objetivos de recuperação e das condições ambientais. O desenvolvimento e a implementação desses solos artificiais exigem considerações cuidadosas para garantir a eficácia a longo prazo e a minimização dos impactos ambientais. No presente estudo, os Tecnossolos estão a ser utilizados, pela primeira vez, na recuperação das funções ecológicas e produtivas de solos de áreas aridas.

### **2.1.3. Propriedades químicas do solo**

Segundo Mandal (2016), as propriedades químicas do solo dependem em grande parte das colisões do solo, sendo assim, é importante conhecer os coloides do solo para entender a sua influência nas propriedades químicas.

Os coloides de um solo são a parte mais reativa dos sólidos do solo, possuindo relação direta com a sua capacidade de interagir com outros componentes, como nutrientes e água. Os coloides têm superfícies carregadas que são capazes de absorver ou atrair iões (partículas carregadas) dentro da solução do solo. Eles podem ser de natureza orgânica ou inorgânica. Os coloides orgânicos são compostos por matéria orgânica (húmus do solo), que podem estar associados aos coloides inorgânicos ou presentes de forma isolada. Os coloides inorgânicos são dominados pelos minerais de argila, que desempenham um papel central na definição das propriedades físicas e químicas do solo (Mandal, 2016; McCauley, 2023).

As propriedades químicas, como quantidade de fósforo e azoto e iões de cálcio, magnésio e potássio, são essenciais para a nutrição das plantas e, assim, contribuir para a produtividade (Bessou, 2015). Dentre as propriedades químicas dos solos, destaca-se as que serão estudadas no presente trabalho, como o teor de matéria orgânica, o pH, fósforo e potássio extraíveis e o azoto.

O teor e as características da matéria orgânica no solo podem variar dependendo das condições em que ela se armazena e se transforma. O clima é um dos fatores mais importantes pois, normalmente, é o que vai influenciar mais a atividade biológica do solo e conseqüentemente a taxa de decomposição da matéria orgânica (isto devido ao controlo da humidade, precipitação e temperatura) (Teixeira, 2021). Além disso, o tipo de matéria orgânica, a forma como é aplicada ou incorporada no solo e a forma como é decomposta influencia o equilíbrio físico, químico e biológico do solo, podendo mudar a quantidade

de azoto disponível para as plantas, a quantidade de outros nutrientes disponíveis e mesmo a agregação do solo (Bot & Benites, 2005).

Segundo Vieira (2017), o azoto desempenha um papel fundamental na obtenção de altas produtividades, sendo um elemento crucial na nutrição mineral das plantas. Contudo, devido às significativas perdas desse nutriente no ambiente, a eficiência de sua utilização pelas culturas é relativamente baixa. O azoto presente no solo ocorre em duas formas principais: orgânica e inorgânica. Entre essas formas, algumas são solúveis, enquanto outras são relativamente insolúveis; algumas apresentam mobilidade no solo, enquanto outras são imóveis; e há aquelas que estão disponíveis para absorção pelas plantas, enquanto outras não.

Diferentemente do azoto, o fósforo é um elemento de muito baixa mobilidade no solo, no qual encontra-se como ortofosfatos. O fósforo, pelas baixas concentrações existentes em solução, chega às raízes principalmente pelo mecanismo de difusão. O mesmo acontece com o potássio, mas, neste caso, as concentrações na solução do solo são maiores e a mobilidade do elemento, embora baixa quando incorporado na estrutura de minerais de argila, é maior que a de fosfatos, principalmente se os teores de sais da solução do solo forem consideráveis, o que permite parte do potássio ficar em solução (Raij, 2011).

Muitas propriedades químicas dos solos giram em torno das reações do solo. No que diz respeito à sua natureza, alguns solos são neutros, alguns são ácidos e outros básicos. A acidez, alcalinidade e neutralidade dos solos são descritas em termos de concentrações de íons hidrogênio ou valores de pH. Para entender a reação do solo, o conhecimento do pH é muito necessário (Balasubramanian, 2017).

#### **2.1.4. Propriedades físicas do solo**

De acordo com Brady & Weil (2010), as propriedades físicas dos solos são processos ou reações de um solo que são causadas por forças físicas e que podem ser descritos ou expressos em termos físicos ou equações. Alguns exemplos de propriedades físicas são: densidade, capacidade de retenção de água, condutividade hidráulica, porosidade, agregação, entre outras.

Embora um punhado de terra possa à primeira vista parecer exclusivamente matéria

sólida, é importante ressaltar que apenas cerca de metade do volume do solo é material sólido (mineral e orgânico); a outra parte são espaços porosos preenchidos com ar ou água. O solo é composto de minerais, matéria orgânica, água e ar, sendo que a composição e proporção desses componentes influencia muito as propriedades físicas do solo, incluindo textura, estrutura, porosidade e a fração do espaço poroso. Por sua vez, essas propriedades afetam o movimento do ar e da água no solo, e, portanto, a capacidade de funcionamento do solo (Brady & Weil, 2010; McCauley, 2023).

Segundo Pereira (2019), os indicadores físicos de qualidade do solo são fundamentais devido à sua importância nos processos hidrológicos, incluindo escoamento superficial, taxa de infiltração, drenagem e erosão. Além disso, desempenham funções essenciais, como fornecer, armazenar e reciclar água, nutrientes, energia e oxigênio no solo.

Este estudo avalia propriedades físicas e químicas do solo, incluindo densidade aparente, presença de elementos grosseiros, permeabilidade, capacidade máxima de retenção de água, capacidade de campo, porosidade total, distribuição de poros (micro e macroporosidade) e estabilidade dos agregados.

#### **2.1.5. Estabilidade dos agregados do solo**

A estrutura e a formação de agregados no solo são aspectos fundamentais que influenciam diversas propriedades do solo, como a porosidade total do solo, que inclui microporos (poros com dimensões inferiores a 0,05 mm) e macroporos (poros com dimensões superiores a 0,05 mm) que, por sua vez, interferem diretamente na capacidade de infiltração e retenção de água, no arejamento do solo, e no crescimento, expansão e desenvolvimento das raízes das plantas (Porta et al., 2003; Costa, 2018).

Solos que apresentam macroporos em quantidades maiores, possibilitam uma infiltração mais rápida, contribuindo para diminuir o fluxo superficial e consequentemente os processos erosivos, sendo também bem arejados (Mattos et al., 2022). Em contrapartida, solos com maior quantidade de microporos têm uma maior capacidade de retenção de água e baixo arejamento (Andreoli et al., 2014).

Solos com boa estrutura e agregação são mais resistentes à erosão hídrica e eólica. A existência de agregados estáveis no solo ajuda a proteger a superfície do solo contra o

impacto direto das gotas de chuva e a diminuir a perda de solo e de nutrientes. Por outro lado, influenciam a capacidade do solo reter e liberar nutrientes para as plantas e, contribuem para a formação de microambientes favoráveis à atividade microbiana e ao desenvolvimento das raízes, facilitando a disponibilidade de nutrientes no solo (Santos, 2015). Também têm maior capacidade de armazenar matéria orgânica e carbono orgânico, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

O solo constitui o maior reservatório de carbono nos ecossistemas terrestres (Fonseca et al., 2022). Este acréscimo de matéria orgânica leva a um aumento da porosidade e conseqüente redução da densidade aparente do solo, assumindo estas propriedades físicas elevada importância, especialmente nas condições mediterrânicas, uma vez que estão ligadas aos processos hidrológicos do solo e à disponibilidade de oxigênio para as raízes das plantas (Benhalima et al., 2022).

Resumindo, a estrutura e a formação de agregados são aspectos essenciais que influenciam uma série de propriedades do solo, incluindo a porosidade, arejamento, capacidade de infiltração e drenagem, resistência à erosão, retenção de nutrientes e capacidade de armazenamento de carbono. Gerenciar e promover uma boa estrutura do solo é fundamental para garantir a produtividade agrícola, a saúde do solo e a sustentabilidade ambiental.

## **2.2. Fogo**

Segundo estudo de Leite et al. (2013), é ressaltado que o regime de ocorrência, a frequência e a intensidade do fogo têm sofrido alterações significativas ultimamente, ainda que tenha desempenhado um papel crucial na formação dos ecossistemas mediterrâneos.

As queimadas, muito comuns num passado recente, também são responsáveis pela degradação dos solos, visto que alguns nutrientes são voláteis, como o azoto, além de ser eliminada praticamente toda a microflora e microfauna das camadas superficiais do solo (Andreoli et al., 2014).

O fogo reduz ou elimina temporariamente a cobertura vegetal e diversas alterações podem ocorrer ao nível das propriedades físicas, químicas, mineralógicas e biológicas do solo (Nogueira et al., 2015).

### **2.2.1. Ocorrência de incêndios em Portugal**

Segundo dados do ICNF, o número dos grandes incêndios florestais ( $\geq 100$  ha), é responsável pela maioria da área ardida anualmente. Segundo Bento-Gonçalves & Vieira (2021), Portugal é um país onde a recorrência, a dimensão e a intensidade dos incêndios florestais lhes conferem um lugar de destaque no conjunto dos principais riscos que enfrenta no Séc. XXI.

À vista disso, observa-se que os incêndios florestais em Portugal continental, se mostram uma condição ambiental de grande relevância, e que se explica devido às características do clima. Com a crescente ocorrência de incêndios e devido à importância do solo, torna-se necessário mais estudos sobre os efeitos dos fogos nas propriedades do solo.

O governo português tem implementado várias medidas para prevenir e combater os incêndios, incluindo o reforço da vigilância, a melhoria das infraestruturas de combate a incêndios, a sensibilização pública para a prevenção e a adoção de políticas de gestão florestal mais sustentáveis. Apesar desses esforços, os incêndios continuam a ser uma preocupação séria em Portugal, causando perdas humanas, danos materiais, e impactos ambientais significativos. A gestão integrada do território e a coordenação entre diferentes entidades governamentais e partes interessadas são essenciais para enfrentar esse desafio de forma eficaz e mitigar os riscos associados aos incêndios florestais.

A gestão inadequada das florestas, incluindo a falta de limpeza de matas, a monocultura de espécies inflamáveis (pinheiro, eucalipto, matagais), e a ausência de medidas preventivas, aumentam o risco de incêndio (Simões, 2018). Também as atividades humanas, como queimadas não controladas, negligência na utilização de fogo em práticas agrícolas e florestais, e até mesmo ações criminosas, podem desencadear incêndios (Gomes, 2012).

### **2.2.2. Impactos do fogo nas propriedades do solo**

As mudanças causadas pela passagem do fogo variam conforme diversos fatores, como a intensidade e a duração do fogo, o relevo, o grau de umidade do solo, entre outros. O grau de severidade e duração do fogo e as características intrínsecas do solo contribuem para uma recuperação distinta do sistema solo-planta pós-fogo e para a sua produtividade. Portanto, estudar a dinâmica pós-fogo das propriedades do solo é de grande preocupação

para a conservação e produtividade dos ecossistemas (Benhalima et al., 2022).

Nota-se que as propriedades do solo são alteradas quando este é exposto a temperaturas elevadas, como o fogo. Segundo Mattos et al. (2022), as maiores transformações no solo podem ser correlacionadas com os incêndios, ou seja, fogo de alta intensidade. Já Andreoli et al. (2014), aponta que, para além de poder causar desestruturação no solo, o fogo de alta intensidade também afeta a biologia do solo, e reduz sua fertilidade natural devido à queima da matéria orgânica.

O fogo provoca diversos impactos nas características físicas do solo, como redução dos macroporos, da estabilidade dos agregados, da taxa de infiltração de água no solo, além do aumentar a compactação do solo e dificultar o crescimento e expansão das raízes. Além disso, torna o solo mais suscetível à erosão devido à perda do coberto vegetal (Redin et al., 2011).

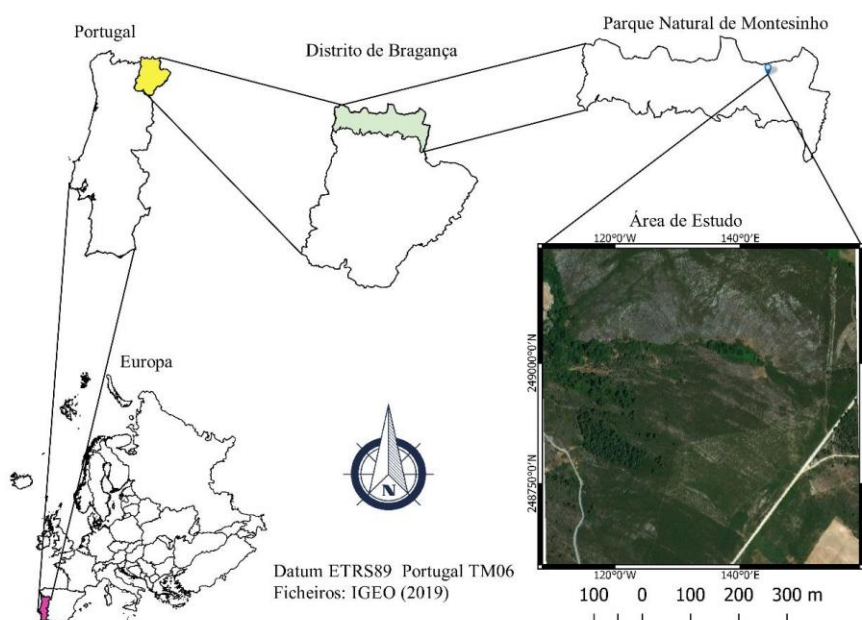
Já para as propriedades químicas, muitos trabalhos relatam efeitos como o aumento nos teores de nutrientes mineralizados como azoto, fosforo, potássio, cálcio, magnésio, entre outros, após a passagem do fogo, devido as cinzas possuírem uma grande concentração desses nutrientes.

Dessa forma, reforça-se a gravidade dos incêndios em florestas e áreas de vegetação, além de reforçar a importância e a urgência de desenvolver medidas preventivas para evitar incêndios de grandes proporções, assim como a necessidade de promover estudos sobre os impactos gerados pelo fogo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo se encontra no Parque Natural de Montesinho (PNM), NE Portugal. O PNM se encontra na fronteira de Portugal com Espanha e engloba as serras de Montesinho e da Coroa. O local de estudo se caracteriza como uma área coberta por matos mediterrâneos, e está situada próxima da aldeia de Aveleda, Bragança (41°53'57.06"N, 6°40'55.39"O) (Figura 1). O estudo foi realizado no âmbito do Projeto TERRAMATER - Medidas inovadoras de recuperação preventiva em áreas queimadas. Financiado pelo Programa Interreg POCTEP (0701\_TERRAMATER\_1\_E).



**Figura 1** - Localização geográfica da área de estudo.  
Fonte: Silva (2019).

O PNM foi criado pelo decreto de lei nº 355/79 de 30 de agosto, que visa a conservação, proteção e valorização dos recursos disponíveis no local (IPB/ICN, 2007). Apresenta uma área de 750 km<sup>2</sup> e relevo ondulado, com cumes planos a arredondados, cortados por vales profundos que descarregam uma rede hidrológica temporária ou permanente (Santos, 2022).

A área de estudo está localizada numa zona de planalto com 800 m de altitude, temperatura média anual de 12°C e precipitação média anual de 850 mm, concentrada nos meses entre outubro a abril e uma estação seca marcada entre junho e agosto (Agroconsultores & Coba, 1991). Ainda segundo os mesmos autores, os solos são

classificados como Leptosolos Úmbricos derivados do xisto com elevada pedregosidade, textura média, ácido, teor de matéria orgânica moderado a alto, baixa saturação de bases de troca e baixa capacidade de troca catiônica, teores muito baixos de P e moderados de K (Agroconsultores & Coba, 1991; Fonseca et al., 2017). Em cerca de 5 ha da área de estudo, no mês de março de 2021, foi realizado um fogo controlado com vista à criação de faixas de descontinuidade e consequente proteção de uma floresta de 12 ha de *Pinus pinaster* com cerca de 40 anos de idade.

Após o fogo, foi instalada uma parcela piloto com 500 m<sup>2</sup> de área, onde foi realizada a aplicação de Tecnosolos na superfície com uma espessura média de 5 cm (Figura 2 e Figura 3 ). Este ensaio representa a primeira vez em que Tecnosolos foram utilizados como técnica de conservação do solo pós-fogo controlado. O presente estudo, que visa avaliar efeitos dos Tecnosolos em propriedades do solo, representa uma parte de um trabalho muito mais amplo onde estão a ser estudados os efeitos do fogo e do uso de Tecnosolos no solo.



**Figura 2** - Aplicação do Tecnossolo na área de estudo.



**Figura 3** - Espalhamento do Tecnosolo na parcela de estudo.

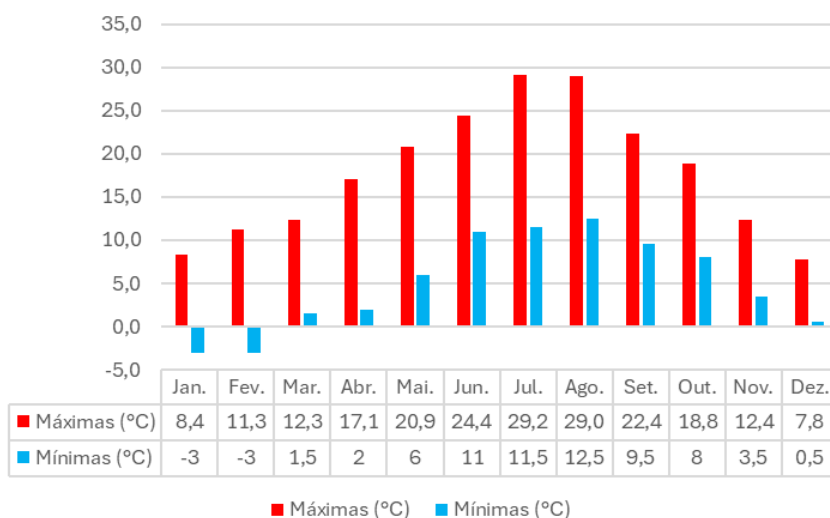
### **3.2. Caracterização climática**

Bragança está localizada na região de Trás-os-Montes, no nordeste de Portugal, apresenta um clima mediterrânico de influência continental, sendo assim possui verões quentes, invernos rigorosos e uma grande amplitude térmica anual. Para categorização dos diferentes tipos de clima do mundo, utiliza-se a Classificação Climática de Köppen, a qual usa cinco grupos para dividir os climas, sendo que cada grupo é subdividido com base em critérios mais específicos. Assim, segundo Köppen, a classificação climática de Bragança é Csb (temperado com verão seco e temperado), sendo este o clima que abrange a maior parte do noroeste da Península, bem como grande parte do litoral oeste de Portugal.

Para realização da caracterização climática da área, foram utilizados dados do METAR (METeorological Aerodrome Report), o qual fornece informações sobre o clima atual e dados do TAF (Terminal Area Forecast), que fornece uma previsão para um período mais longo, sendo que ambos são utilizados para aviação, com dados meteorológicos precisos e recentes. A localização do METAR-TAF utilizado corresponde ao aeródromo de Bragança, situado cerca de 3 km da área de estudo.

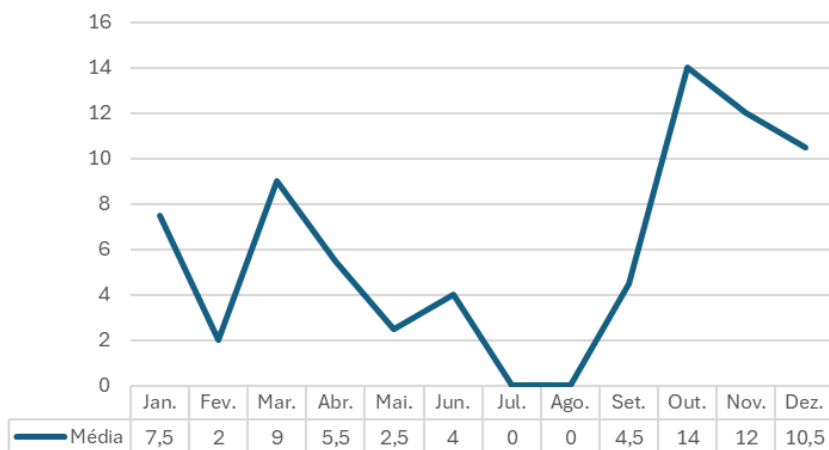
Os dados obtidos se referem aos anos de 2022 e 2023, e com isso foi realizada a média de distribuição mensal das temperaturas máximas e mínimas (Figura 4 Assim, os

meses de julho e agosto são os meses mais quentes, enquanto janeiro e fevereiro representam os meses mais frios, com temperaturas mínimas negativas.



**Figura 4** - Média de distribuição mensal das temperaturas máximas e mínimas no aeródromo de Bragança nos anos de 2022 e 2023.

Para a precipitação também foi realizada a média mensal entre os anos de 2022 e 2023, sendo julho e agosto os meses com menos chuva (0%) e outubro o mês com maior percentagem de chuva.



**Figura 5** - Média de distribuição mensal da precipitação no aeródromo de Bragança nos anos de 2022 e 2023.

### 3.3. Caracterização dos solos

A geologia e a geomorfologia do Parque Natural de Montesinho apresentam uma grande diversidade resultante da sua integração nas Zonas Centro Ibérica e Galiza-Trás-os-Montes, que se caracterizam por apresentar um dos enquadramentos geológicos mais

complexos da Península Ibérica (ICNF).

O relevo do Nordeste de Portugal é marcado por grande irregularidade, o que contribuiu para a formação de solos com espessura relativamente baixa (Leptosolos). Isso pode decorrer tanto da meteorização limitada, causada pela baixa quantidade de água infiltrada, quanto da intensa erosão gerada pela alta proporção de água que escoou superficialmente. Por esse facto, os Leptosolos são os mais representados nas regiões com relevo movimentado (Agroconsultores & Coba, 1991).

Os xistos representam a litologia dominante, tendo, no entanto, expressão relevante os afloramentos de rochas básicas e as manchas graníticas na parte superior da serra de Montesinho. Os solos são, em sua maior parte, delgados, com alta pedregosidade e ácidos, com teores de matéria orgânica relativamente elevados nas zonas mais altas e húmidas do Parque (Bompastor et al., 2009). Na área de estudo, predominam os Leptosolos Úmbricos derivados do xisto (Agroconsultores & Coba, 1991) com elevado teor de elementos grosseiros e conteúdo de matéria orgânica moderado a alto (Fonseca et al., 2017).

### **3.4. Vegetação**

Segundo estudo realizado por Bompastor et al. (2009), cerca de um terço da área do Parque Natural de Montesinho estão cobertos por matos, que desempenham funções essenciais nos serviços ecossistêmicos, como regulação hídrica e armazenamento de carbono, alinhando-se às preocupações atuais com a proteção do solo e as mudanças climáticas.

Em um estudo realizado na mesma área por Fonseca et al. (2022), foi observado que a vegetação era constituída (antes do fogo controlado), essencialmente por urze (*Erica australis*, 44%), carqueja (*Chamaespartium tridentatum*, 30%) e esteva (*Cistus ladanifer*, 26%). Ainda pelo mesmo estudo, a carqueja e a urze obtiveram um fator de combustão igual a 80%, já a esteva apresentou uma maior resistência ao fogo, com um fator de combustão igual a 50%.

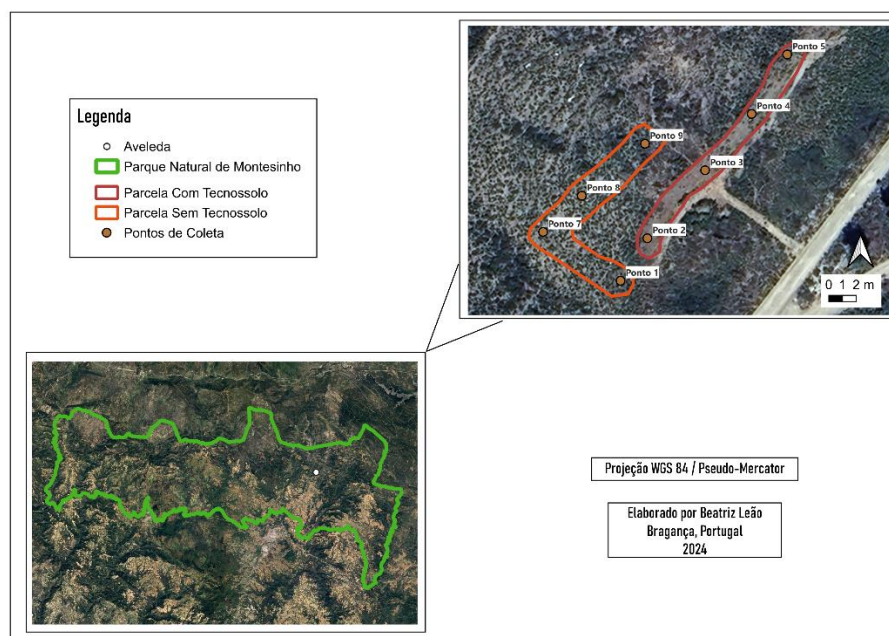
### **3.5. Áreas de amostragem**

Foram definidas duas áreas de amostragem na área ardida com fogo controlado: uma com aplicação de Tecno solo na superfície (CTS) e outra como controlo, sem

aplicação de Tecno solo (STS). O Tecno solo foi aplicado na área de estudo em 23 de junho 2021, três meses após a realização do fogo controlado, em um volume total de 40 m<sup>3</sup>. Esse material formou uma camada de 5 cm de espessura aproximadamente, cobrindo uma área de 500 m<sup>2</sup>, englobando os pontos 2, 3, 4 e 5. A área controlo abrangeu os pontos 1, 8, 9 e 10 (Figura 6). Não foi possível aplicar o Tecno solo logo a seguir ao fogo, como era objetivo do projeto TERRAMATER, devido à pandemia COVID-19, uma vez que o Tecno solo foi transportado de Espanha e as fronteiras foram encerradas nessa altura, sendo reabertas a 22 de junho de 2021.

### 3.6. Coleta e processamento das amostras de solo

Em setembro de 2023, 30 meses após o fogo controlado e 27 meses após a aplicação do Tecno solo, em cada área de amostragem foi estabelecido um transecto e em cada transecto selecionaram-se quatro pontos, com distância aproximada de 15 m (Figura 6), onde foi realizada a coleta de amostras perturbadas e não perturbadas de solo nas profundidades 0-3, 3-6, 6-10 e 10-20 cm. Igualmente, na camada superficial do Tecno solo foram coletadas amostras perturbadas e não perturbadas (camada de cerca de 5 cm). Foram ainda coletadas amostras não perturbadas na camada 0-5 cm de solo.



**Figura 6** - Localização dos pontos de coleta de amostras de solo.

As amostras perturbadas foram colocadas para secar na estufa a 40°C durante 48 horas. Posteriormente, uma parte de cada amostra foi crivada de forma manual em crivos

com malha de 2 mm e 1 mm, separando assim as partículas com dimensões entre 1 e 2 mm, que foram utilizadas na avaliação da estabilidade dos agregados do solo. A restante parte das amostras perturbadas foram crivadas num agitador de peneiros com crivo de malha de 2 mm. Isto permitiu separar a fração elementos grosseiros, ou seja, partículas com dimensões superiores a 2 mm, da fração de terra fina (partículas com dimensões inferiores a 2 mm).

As análises químicas (matéria orgânica, azoto, fósforo e potássio extraíveis e pH) foram determinadas na fração de terra fina das amostras colhidas nas diversas profundidades (0-3, 3-6, 6-10 e 10-20 cm e no Tecnosolo) dos dois tratamentos (CTS e STS). As amostras não perturbadas (colhidas nas camadas 0-3, 3-6, 6-10 e 10-20 cm e no Tecnosolo), secaram em estufa a 105°C por 48 horas, seguidas de pesagem e avaliação da densidade aparente do solo. Já com as amostras não perturbadas da camada superficial de 0-5 cm do solo e do Tecnosolo, foi possível avaliar as propriedades físicas do solo, como a permeabilidade, porosidade (microporosidade e macroporosidade), capacidade de campo e capacidade máxima para a água.

### **3.7. Avaliação de propriedades químicas do solo**

Para as análises das propriedades químicas do solo, as amostras de terra fina foram colocadas em saquinhos e enviadas ao Laboratório de Solo da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). As análises químicas incluíram a matéria orgânica do solo, pH em solução de H<sub>2</sub>O e pH em solução de KCl, fósforo e potássio extraíveis, e azoto total.

#### **3.7.1. Matéria orgânica**

A percentagem do carbono orgânico do solo (CO), determinou-se por combustão a 1000°C em analisador elementar (Neves, 2015). O teor da matéria orgânica (MO) foi calculado pela multiplicação do teor de carbono pelo factor mais comumente aceite, equivalente a 1,724, tendo atenção a percentagem média de carbono dos compostos orgânicos do solo (MO = 58% C).

No Quadro 1 é possível observar a classificação dos horizontes do solo relativo ao seu teor de matéria orgânica Santos (2015).

**Quadro 1** - Indicação do teor de matéria orgânica de horizontes do solo (Santos, 2015).

<b>Matéria Orgânica (%)</b>		<b>Designação indicativa do nível de Matéria Orgânica</b>
Textura Grosseira	Textura média a fina	
> 20	> 30	Orgânico
20 - 10	30 - 15	Muito alto
10 - 5	15 - 7	Alto
5 - 2	7 - 2	Médio
2 - 0,5	2 - 1	Baixo
< 0,5	< 1	Muito Baixo

### **3.7.2. Azoto total**

A determinação do azoto total foi realizada por combustão a 1000°C com analisador elementar, método descrito por Neves (2015).

### **3.7.3. Valores de pH**

O pH de um solo é uma medida utilizada para indicar se um solo é ácido ou alcalino, sendo expresso em uma escala de 0 a 14. Os valores de pH em soluções de H<sub>2</sub>O e de KCl, foram determinados a partir do método potenciométrico, em suspensões de solo: água e solo:KCl (1:2,5), seguindo a metodologia descrita por Mclean (1982).

A medição de pH do solo em água dá indicação da acidez atual, correspondente às condições que as plantas enfrentam no solo, a medição em KCl mede a acidez potencial, ou seja, a acidez que pode ser liberada ao longo do tempo. Com isso, a medição em solução de KCl é particularmente útil para se prever a necessidade de correção do solo.

No Quadro 2, são apresentados os intervalos de pH (H<sub>2</sub>O) e respetiva classificação do solo (Costa, 2018).

**Quadro 2** - Intervalos de pH (H<sub>2</sub>O) e classificação do solo quanto à reação (Costa, 2018).

<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	<b>Classificação</b>
4,5	Hiperácido
4,6 – 5,5	Ácido
5,6 – 6,5	Subácido
6,6 – 7,5	Neutro
7,6 – 8,5	Subalcalino
8,6 – 9,5	Alcalino
9,6 ou maior	Hiperacalino

### 3.7.4 Fósforo e potássio extraíveis

A determinação de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e potássio (K<sub>2</sub>O) extraíveis foram realizadas pelo Método Egner-Riehm, conforme Balbino (1968), sendo extraídos com lactato e acetato de amônio a pH 3,8 e determinados por analisador segmentado (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e absorção atômica (K<sub>2</sub>O).

A classificação dos solos com base nos teores de fósforo e potássio extraíveis pode ser realizada utilizando o método de Egner-Riehm, conforme os valores apresentados no Quadro 3 (Santos, 2015).

**Quadro 3** - Classificação dos solos quanto aos teores de fósforo e potássio extraíveis (Santos, 2015).

<b>teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ou K<sub>2</sub>O (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Apreciação</b>
< 25	Muito baixo
26 - 50	Baixo
51 - 100	Médio
101 - 200	Alto
> 200	Muito alto

## 3.8. Avaliação de propriedades físicas do solo

### 3.8.1. Densidade aparente

A Densidade Aparente (Dap) é considerada como um valor adimensional, que pode ser determinado pela razão da massa volúmica aparente do solo ( $\rho_s$ ) e o produto da massa volúmica da água ( $\rho = 1 \text{ g / cm}^3$ ) pelo volume da amostra.

$$Dap = \frac{\rho_s}{\rho \times V_{amostra}}$$

### **3.8.2. Permeabilidade**

Para a determinação da permeabilidade do solo (K), foram utilizadas amostras de solo coletadas nos 8 pontos da área de estudo, todas retiradas na camada superficial de 0-5 cm de profundidade. O processo de coleta foi conduzido com muito cuidado, assegurando que os anéis destinados a cada amostra contivessem o volume adequado de solo e que não houvesse aderência de material na borda biselada dos anéis.

A permeabilidade do solo foi realizada utilizando um permeâmetro de circuito fechado e carga constante, capaz de analisar simultaneamente até 24 amostras de solo não perturbadas. As amostras foram acondicionadas em anéis de aço inoxidável com volume de 100 cm<sup>3</sup> (20 cm<sup>2</sup> de área e 5 cm de altura). Antes de iniciar o protocolo de saturação das amostras, foram seguidos os seguintes procedimentos:

Primeiramente foi realizada a limpeza externa do anel para poder dispor a gaze hidrófila no filtro e a tampa deste na extremidade não biselada do anel. Após isso, o anel contendo a amostra foi inserido com o filtro voltado para baixo no suporte, para que o fluxo de água seguisse corretamente através da amostra.

Em seguida, foi fechado o grampo e o batente de nylon contra a tampa do filtro, para que o anel pressionasse firmemente contra a tampa, e ficando fixado na armadura de suporte. Por fim, as amostras foram incorporadas no permeâmetro para saturação, por capilaridade, durante um período de 48 horas.

Durante esse processo, o nível de água foi mantido 1cm abaixo da parte inferior da amostra no equipamento. Enquanto os passos acima indicados eram realizados, foi realizado o preenchimento de uma ficha, com dados referentes a hora, data e a indicação da amostra de acordo com o ensaio no permeâmetro.

Após 48 horas, o nível de água foi verificado, e então os sifões foram adicionados, para que a água pudesse circular. A fim de garantir que os sifões não continham bolhas de ar, foram mergulhados debaixo da água, inclinando lentamente para se certificar que não havia ar, sendo os sifões colocados com uma ponta no interior do cilindro da amostra e a outra no tubo sintético de evacuação.

Cada amostra estava conectada com uma bureta de 40 ml, para que o volume de água que flui pela amostra por unidade de tempo fosse medido (Figura 7). As medições foram iniciadas uma hora após os sifões estarem instalados, permitindo que o sistema

estabilizasse, e foram realizadas durante quatro dias seguidos, registrando-se o volume da água acumulado em cada bureta de 40 ml, num período máximo de 30 minutos.



**Figura 7** - Anéis com as amostras de solo encaixados no permeâmetro.

Durante as medições, foi verificado se o sistema de cada amostra estava funcionando de forma correta, a fim de evitar erros leitura. Em seguida, o nível de água no recipiente do permeâmetro era ajustado em uma melhor posição. Para isso, deslizou-se o regulador de nível para cima ou para baixo. A diferença de nível (dH) dentro e fora do cilindro da amostra foi mantida constante. Esta diferença pode sofrer variações entre 2 mm para solos altamente permeáveis, e 20 mm para solos pouco permeáveis.

A medição do nível de água era realizada por meio de um botão rotativo que acionava um sinal luminoso vermelho. Quando a ponteira do medidor entrava em contato com o nível da água, a luz acendia, permitindo a leitura do nível com uma precisão de 0,5 mm. Tanto o nível de água no recipiente quanto no cilindro da amostra foi medido da mesma maneira. A diferença entre os níveis medidos e a quantidade de água utilizada por amostra em um determinado intervalo de tempo foi utilizada para calcular o coeficiente de permeabilidade saturada.

Após leitura final do ensaio, o nível da água foi baixado por completo, até que as amostras conseguissem drenar toda a água. Em seguida, foram retiradas do permeâmetro deixadas em repouso e realizada uma primeira pesagem ao fim de 1 hora (solo saturado). Após 24 horas efetuou-se uma segunda pesagem (solo na capacidade de campo), posteriormente as amostras foram colocadas na estufa a 105°C por um período 24 horas. Após esse tempo, a terceira e última pesagem foi realizada, correspondendo ao peso do

solo seco.

### ***Cálculo Permeabilidade***

Para calcular permeabilidade saturada (K), foi aplicado a Lei de Darcy, dada pela fórmula:

$$K = \frac{V * L}{A * t * dH}$$

Em que,

K – Coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica, em cm/h;

V – Volume de água que flui através da amostra, em 1ml = 1cm<sup>3</sup>;

L – Comprimento da amostra de solo, em cm;

A – Superfície da secção transversal da amostra, em cm<sup>2</sup>;

t – Tempo estabelecido para a medição do volume, em h;

dH – Diferença de nível de água dentro e fora do cilindro da amostra, em cm.

O comprimento (L) e a área da seção transversal (A) permaneceram constantes para todas as amostras, com valores de 5 cm e 20 cm<sup>2</sup>, respectivamente. Os valores de K obtidos foram utilizados para classificar a permeabilidade do solo. (Quadro 4).

**Quadro 4** - Classificação da permeabilidade do solo (SCS/USDA).

<b>Classe de permeabilidade</b>	<b>Valor (cm/h)</b>
Muito rápida	>25,4
Rápida	12,7 – 25,4
Moderadamente rápida	6,35 – 12,7
Moderada	2,00 – 6,35
Moderadamente lenta	0,50 – 2,00
Lenta	0,13 – 0,50
Muito lenta	<0,13

Segundo Figueiredo (2011), apesar da precisão considerada do permeâmetro, é possível considerar que os valores obtidos sejam diferentes das condições *in loco*, muito devido à não uniformidade do solo e a falta de regularidade na coleta das amostras. Portanto, a permeabilidade resultante demonstra a permeabilidade do solo no local em

que a amostra foi coletada.

### 3.8.3. Capacidade máxima para água e capacidade de campo

Pela metodologia descrita por Figueiredo (2011), após a retirada das amostras do permeâmetro, elas foram deixadas em repouso por 24 horas para permitir a drenagem da água presente nos macroporos. Esse processo assegura que somente as moléculas de água que ficam retidas nos microporos permaneçam no solo, permitindo, assim, a estimativa da capacidade de campo (CC).

Para o cálculo do teor de humidade na capacidade de campo (CC), foi realizada a diferença do peso das amostras de solo após 24 horas de drenagem (*Msolo úmida*) e do peso das amostras depois de terem sido secas em estufa a 105°C por 48 h (*Msolo seco*), e dividido pela (*Msolo seco*).

$$CC (\%) = 100 * \frac{M_{solo\ húmido} - M_{solo\ seco}}{M_{solo\ seco}}$$

Já o cálculo da capacidade máxima para água (CMA), foi realizado através da seguinte equação:

$$CMA (\%) = 100 * \frac{M_{solo\ saturado} - M_{solo\ seco}}{M_{solo\ seco}}$$

*Msolo saturado* – peso da amostra após 1 h de drenagem

### 3.8.4. Porosidade total

Também de acordo com a metodologia descrita por Figueiredo (2011), a porosidade total do solo (P) é calculada através da razão entre a água de saturação e o volume do cilindro (volume da amostra).

$$P (\%) = 100 * \frac{M_{solo\ saturado} - M_{solo\ seco}}{V_{cilindro}}$$

### 3.8.5. Microporosidade e macroporosidade

A microporosidade (MicroP) é relacionada com o volume de poros do solo com diâmetros menores que 0,05 mm (Teixeira et al., 2017). Os poros, devido às suas

pequenas dimensões, possuem a capacidade de retenção e armazenamento de água por meio da capilaridade, desempenhando um papel crucial na manutenção da humidade do solo. A retenção de água nos poros pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$\text{MicroP (\%)} = \%CC * Dap$$

Já a macroporosidade (MacroP) se refere aos poros com diâmetros superiores a 0,05 mm e desempenha um papel crucial no escoamento da água pelo solo, fornecendo caminhos preferenciais para o crescimento das raízes e promovendo a aeração do solo. Sua determinação é feita por meio da seguinte equação:

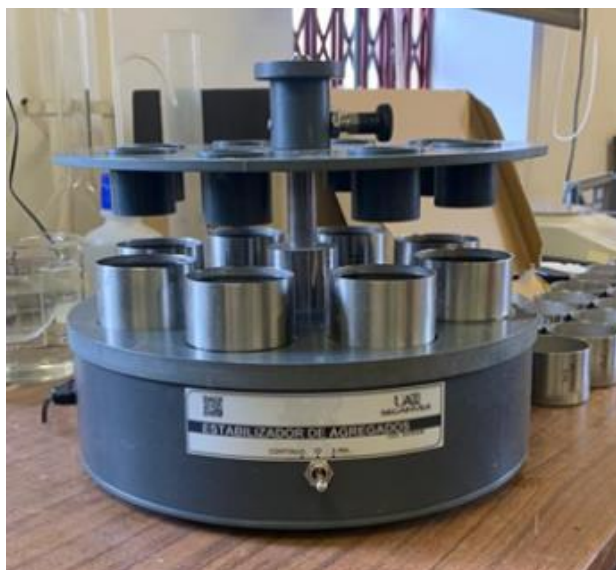
$$\text{MacroP (\%)} = P - \text{MicroP}$$

P – Porosidade total do solo

### **3.8.6. Estabilidade dos agregados do solo**

Na avaliação da estabilidade dos agregados do solo (EA) utilizaram-se apenas as partículas com dimensões entre 1 e 2 mm (como referido anteriormente). Foram estabelecidas duas classes de agregados: (1) classe de 0,4 mm e (2) classe de 0,25 mm. A última classe representa o caso limite entre macroagregados (> 250 µm) e microagregados (20-250 µm). Assim, para avaliar a estabilidade das classes dos agregados utilizou-se peneiras de malha 0,4 mm e peneiras de malha 0,25 mm.

Para a análise, foi utilizado o equipamento “estabilizador de agregados” (Figura 8), que funciona por movimentos ascendentes e descendentes, em que os agregados do solo entram em contacto com água destilada, seguida de uma solução de hexametáfosfato de sódio. Esse processo simula as forças mecânicas e físico-químicas do solo, permitindo a dispersão tanto dos agregados instáveis (contacto com a água) quanto dos estáveis (contacto com a solução de hexametáfosfato) do solo.



**Figura 8** - Estabilizador de agregados

A análise de estabilidade de agregados foi realizada em quatro repetições, portanto, os passos a seguir são referentes a cada amostra, sempre repetindo quatro vezes devido às repetições.

Foram realizadas duas análises no estabilizador de agregados, sendo uma para agregados com contacto com a água, ou seja, partículas instáveis, e outra para agregados em contacto com a solução dispersante de hexametáfosfato de sódio, ou seja, as partículas estáveis. As análises possuíram metodologias levemente distintas para cada uma.

Para iniciar, foi realizada a pesagem de 4g de solo de cada amostra, e alocada em um recipiente, para cada uma das quatro repetições.

Com isso, foi iniciada a análise de agregados em contacto com a água (partículas instáveis). Adicionou-se 100 ml de água destilada em cada um dos recipientes metálicos próprios para uso no equipamento respectivos para cada repetição. Os recipientes foram posicionados no equipamento, e de forma cuidadosa foi depositado os 4g de amostras de solo em cada recipiente (utilizando crivos com malha de 0,4 mm ou 0,25 mm, conforme necessário).

Após o solo adicionado, a plataforma foi abaixada até que os crivos com as amostras ficassem totalmente submersos no recipiente contendo água destilada, e o equipamento foi ligado e mantido em funcionamento por 3 minutos.

Ao fim do tempo, a plataforma foi levantada até o limite máximo, a fim de permitir

que a água nos crivos pudesse escoar completamente. Com isso, os recipientes contendo as partículas instáveis puderam ser removidos do equipamento, e transferidos para potes de plástico. Com o auxílio de um pouco de água destilada, deve-se garantir que todo o material seja lavado e transferido adequadamente.

Por fim, os potes de plástico contendo as partículas instáveis foram colocados na estufa a 105°C durante 24 horas para secagem completa.

Referente a análise de agregados em contacto com a solução dispersante de hexametáfosfato de sódio (partículas estáveis), foi adicionado 100 ml da solução dispersante (hexametáfosfato de sódio) cada recipiente adaptado para equipamento, correspondendo sempre às quatro repetições.

Os recipientes contendo a solução dispersante foi alocada no equipamento, e a plataforma foi abaixada, permitindo que os crivos com amostra de solo ficassem completamente submersos na solução.

O aparelho foi ligado e mantido em funcionamento por 8 minutos. Após esse tempo, a plataforma foi elevada até o limite máximo, permitindo o escoamento completo da solução nos crivos. Posteriormente, a plataforma foi novamente abaixada, mantendo os crivos completamente submersos na solução dispersante. Mais uma vez o aparelho foi ligado e mantido em funcionamento por mais 8 minutos.

Concluída a segunda etapa de agitação, a plataforma foi elevada e os recipientes do aparelho foram retirados. Todo o conteúdo com partículas estáveis foi transferido para potes plásticos, lavando cuidadosamente com água destilada utilizando um esguicho de laboratório para garantir a total transferência do material.

Por fim, os potes de plásticos contendo as partículas estáveis foram colocados em estufa a 105°C e mantidos lá até secar por 24 horas. Após esse período, os potes foram retirados da estufa para determinação do peso final seco de cada amostra.

#### ***Cálculo da estabilidade dos agregados e das partículas primárias:***

- Estabilidade dos agregados

$$EA(\%) = \frac{Pf_S}{Pf_{H_2O}} * 100$$

- Partículas Primárias

$$PP(\%) = \frac{Pi - (Pf_{H_2O} + Pfs)}{Pi} * 100$$

Em que:

*Pfs*: peso final seco da amostra (g) após a etapa de dissolução química com a solução de hexametáfosfato de sódio, conhecida como fase estável dos agregados;

*Pf<sub>H<sub>2</sub>O</sub>*: peso final seco da amostra (g) após a etapa utilizando água destilada para dissolução, conhecida como fase instável dos agregados;

*Pi*: corresponde ao peso (g) da amostra inicial colocada no crivo, sendo esse uma quantidade fixa de 4g.

### **3.9. Análises Estatísticas**

O tratamento estatístico dos resultados foi realizado com os softwares Excel RStudio e BioEstat. As análises incluíram: estatística descritiva, análise de variância, teste de comparação de médias para 5% de probabilidade e avaliação de correlações significativas com  $p < 0,05$ .

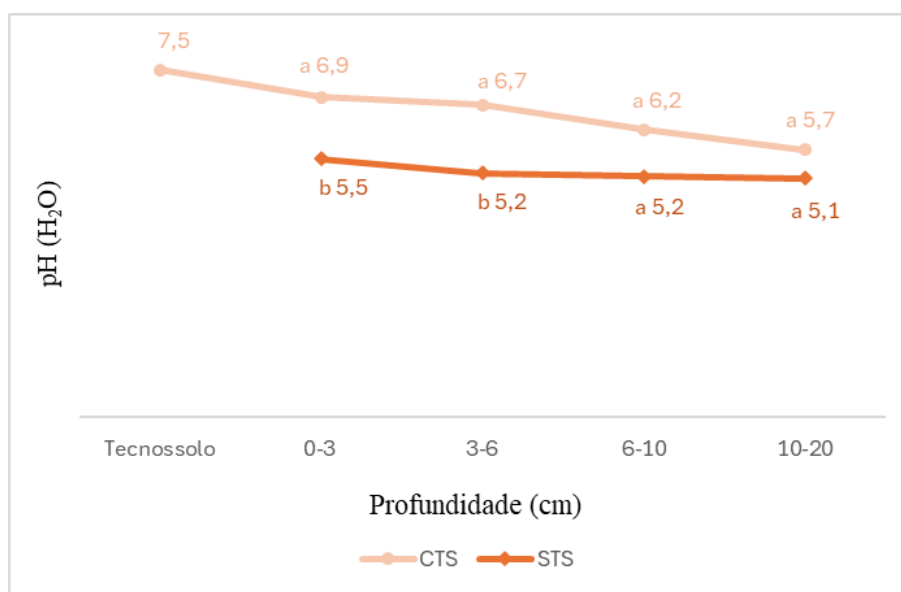
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1.1. Propriedades químicas do solo

#### 4.1.1. Reação do solo

A reação, ou seja, o pH de um horizonte do solo se refere ao grau de acidez ou basicidade e pode ser dada pelos valores de pH. A reação do solo depende do teor de hidrogênio ionizável, do teor de alumínio e, com menor expressão, dos íons de manganês e ferro (Porta et al., 2003; Costa, 2018). Através da Figura 9, que apresenta os valores de pH (H<sub>2</sub>O), constata-se que todas as camadas do solo do tratamento STS são classificadas como ácidas (valores de pH no intervalo 4,6-5,5) (Costa, 2018).

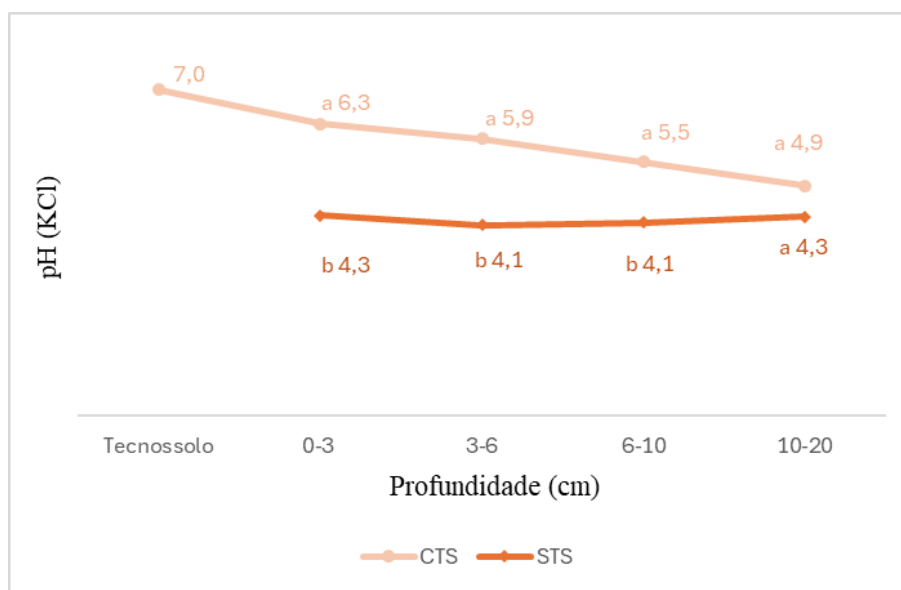
Já o Tecnosolo, com pH 7,5, contribuiu para uma redução estatisticamente significativa da acidez do solo nas camadas superficiais (0-3 e 3-6 cm), sendo todas as camadas do tratamento CTS subácidas a neutras (valores de pH no intervalo 5,6-7,5) (Costa, 2018). Ao fim de 27 meses, são visíveis os efeitos do Tecnosolo na reação do solo até 20 cm de profundidade. As camadas 0-3 e 3-6 cm são classificadas como neutras (valores de pH no intervalo 6,6-7,5), enquanto as camadas 6-10 e 10-20 cm são classificadas como subácidas (valores de pH no intervalo 5,6-6,5).



**Figura 9** - Valores do pH (H<sub>2</sub>O) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

O pH (KCl), acidez potencial do solo, caracteriza o poder tampão de acidez do solo. Sempre que a diferença entre os valores de pH (H<sub>2</sub>O) e pH (KCl) for  $> 1$ , o solo apresenta

uma acidez potencial forte, se a diferença variar no intervalo 0,5-1 a acidez potencial é média, quando  $< 0,5$  a acidez potencial é baixa (Porta et al., 2003; Costa, 2018). Com base nos dados apresentados nas Figura 9 (valores de pH em água) e Figura 10 (valores de pH em KCl), observa-se que o solo do tratamento STS mostra, geralmente, uma acidez potencial forte. Em oposição, o solo com aplicação de Tecno solo (CTS) exibe, para todas as camadas, uma acidez potencial média. Nos solos bem providos de coloides, a diferença entre as duas medidas de pH tende a ser maior e o poder tampão do solo também (Porta et al., 2003).

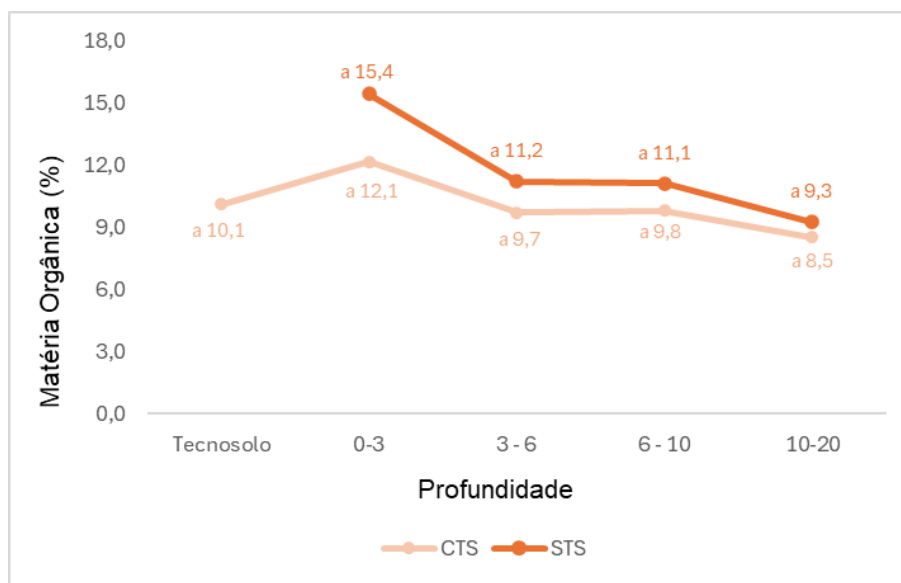


**Figura 10** - Valores de pH (KCl) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecno solo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Segundo Ashaq et al. (2024), a reação do solo afeta a solubilidade e a absorção de nutrientes, sendo que a faixa ótima de pH ( $H_2O$ ), para a maioria das culturas situa-se no intervalo 6,0-7,5, onde nutrientes essenciais estão prontamente disponíveis para absorção pelas plantas e os efeitos tóxicos são mínimos. Com isso, pode-se inferir que a aplicação do Tecno solo teve um efeito positivo ao manter o pH ( $H_2O$ ) do solo dentro do intervalo considerado ideal para a grande parte das plantas.

#### 4.1.2. Matéria orgânica do solo

Conforme a Figura 11, é possível observar que o teor de matéria orgânica do solo (MO) decresce com o aumento da profundidade, com exceção da camada superficial do Tecno solo, a qual apresenta um valor mais baixo do que a primeira profundidade de coleta de solo (0-3 cm).



**Figura 11** - Teor de matéria orgânica do solo (%) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Ao analisar os valores de matéria orgânica pode-se observar que os teores médios ficaram próximos a 10%, sendo classificados como altos (Santos, 2015). A única exceção foi a profundidade de 0-3 cm no tratamento sem aplicação de Tecnossolo (STS), em que o teor de matéria orgânica atingiu um valor de 15,4%, sendo classificado como muito alto (Santos, 2015). Apesar de não ocorrerem diferenças significativas entre tratamentos em nenhuma das profundidades, o tratamento CTS apresenta sempre valores mais baixos de MO. Esta variação pode ser fundamentada com base na camada de Tecnossolo (espessura média de 5 cm) que ao cobrir as touças da vegetação arbustiva, nomeadamente urze (*Erica australis*) e carqueja (*Chamaespartium tridentatum*), dificultou a capacidade de rebrota dessas espécies, e consequentemente reduziu a produção de biomassa e a adição de resíduos orgânicos ao solo, afetando o teor de matéria orgânica do solo. Este fenómeno é frequentemente observado nas florestas, onde a formação de horizontes orgânicos na superfície dificulta o crescimento da vegetação do sub-bosque (Park, 2015; Fonseca et al., 2019).

Carvalho (2019) refere que o clima Mediterrânico pode acarretar dificuldades em manter teores elevados da matéria orgânica devido a maior ocorrência de precipitação no inverno, o que reduz a produção de biomassa. Por outro lado, a alta temperatura média anual aumenta a taxa de mineralização da matéria orgânica do solo. Contudo, os teores de MO são classificados de altos/muito altos (Santos, 2015), pois trata-se de uma área de

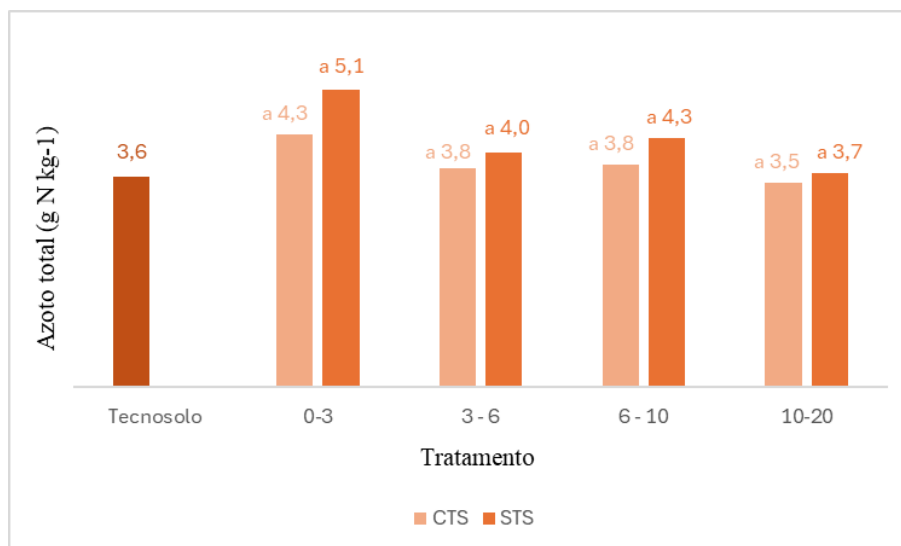
montanha a 800 m de altitude, onde precipitações mais elevadas e temperaturas mais baixas tendem a reduzir a atividade microbiana, favorecendo a acumulação de MO no solo (Patrício et al., 2023). Por outro lado, Fonseca et al. (2022) referem para a mesma área de estudo aumentos de MO no solo pós-fogo. A MO do solo tem um papel fundamental na manutenção da qualidade do solo e na sustentabilidade dos ecossistemas (Percival et al., 2000; Fonseca et al., 2022)

Voitena (2024), num trabalho desenvolvido sobre a comunidade fúngica nesta mesma área de estudo, observou que o fogo e a aplicação de Tecnosolo não afetaram a abundância relativa das guildas de fungos. Assim, apesar das diferenças encontradas na diversidade e composição fúngica entre os tratamentos CTS e STS, não foram observadas diferenças significativas nas guildas ecológicas. Esta observação suporta a hipótese proposta por Allison & Martiny (2008), sugerindo que, mesmo que ocorra alterações na composição microbiana, as semelhanças funcionais com a comunidade original podem persistir. Com base neste conhecimento, pode-se inferir que a ligeira redução do teor de MO no tratamento CTS, poderá dever-se a um possível acréscimo da mineralização da MO uma vez que o pH do solo aumentou favorecendo a atividade biológica do solo. Por outro lado, o decréscimo da MO também estará relacionado com fatores temporários que contribuíram para diminuir os resíduos orgânicos do solo.

A matéria orgânica, principalmente quando bem humificada, contribui muito para a formação de agregados estáveis devido ao seu carácter coloidal, o que melhora a sua resistência à rotura aquando de chuvadas erosivas e contribui para melhorar a permeabilidade e a capacidade de armazenamento de água no solo (Figueiredo 2015).

#### **4.1.3. Azoto total**

De acordo com os resultados expressos na Figura 12, e como seria de esperar, a distribuição do azoto (N) ao longo do perfil do solo mostra um padrão bastante semelhante ao da MO, com valores ligeiramente inferiores no tratamento CTS e mais elevados na camada superficial (0-3 cm). A disponibilidade de azoto mineral no solo depende consideravelmente da mineralização do azoto a partir da matéria orgânica (Rodrigues & Coutinho, 1995; Santos 2015). O aumento do pH em CTS estimulou a atividade dos microrganismos e com ela o aumento da mineralização do N orgânico (Vieria, 2017).



**Figura 12** - Concentração de azoto total ( $\text{g N kg}^{-1}$ ) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Segundo Ferreira et al. (2020), o azoto é o nutriente que as plantas mais utilizam, e pode ser encontrado dentro da planta em quase toda sua totalidade, na maior parte em formas orgânicas. Além disso, é considerado como sendo um elemento muito móvel no solo, podendo ser perdido facilmente por diversos processos tais como lixiviação, erosão, volatilização e desnitrificação. A desnitrificação constitui um processo importante no estudo do N, consistindo na redução bioquímica de nitrato ou nitrito em nitrogênio gasoso, seja como nitrogênio molecular ou como um óxido de nitrogênio (Brady & Weil, 2010).

#### 4.1.4. Fósforo extraível

A aplicação de Tecnosolo ( $2814,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ ) contribuiu para aumentos consideráveis dos teores de fósforo extraível em todas as camadas do solo do tratamento CTS (Quadro 5), sendo os valores classificados como muito altos até 10 cm de profundidade ( $> 200 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e de médios na camada 10-20 cm ( $51-100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Santos, 2015). No tratamento STS (Quadro 5), com exceção da camada superficial (0-3 cm), que apresenta um valor baixo de fósforo ( $26-50 \text{ mg kg}^{-1}$ ), as restantes camadas mostram valores muito baixos ( $< 25 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Santos, 2015).

Apesar de não se ter conhecimento da formulação exata do Tecnosolo aplicado no local, sabe-se que foi elaborado com base em análises de solo da área de estudo, portanto, os elementos presentes serão justamente os mais ajustados para a recuperação das funções do solo, podendo concluir-se que foram adicionadas quantidades significativas de fósforo

na formulação do Tecnosolo.

**Quadro 5** - Fósforo extraível do solo ( $P_2O_5$ ) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

<b>Tratamento</b>	<b>Profundidade (cm)</b>	<b><math>P_2O_5</math> (mg kg<sup>-1</sup>)</b>
(Tecnosolo)	0 – 5	2814,3
CTS	0 – 3	1155,0a
	3 – 6	886,0a
	6 – 10	462,1a
	10 - 20	78,2a
STS	0 – 3	27,1b
	3 – 6	11,1b
	6 – 10	7,0b
	10 - 20	4,8b

Em estudo anteriormente realizado na mesma área de estudo, Nogueira (2014) observou, num período de 36 meses pós-fogo controlado, que os teores de fósforo extraível eram muito baixos, corroborando os valores agora encontrados no tratamento STS (sem Tecnosolo). Porém, atendendo à presença de fungos micorrízicos (Voitena, 2024) a absorção de fósforo pode ser favorecida, mesmo para estas concentrações baixas no solo do tratamento STS (Honrubia et al., 1992).

#### **4.1.5. Potássio extraível**

No Quadro 6 apresentam-se os teores de potássio extraível ( $K_2O$ ). Embora a diferença dos valores entre os tratamentos CTS e STS não sejam tão discrepantes quanto foram para o fósforo, ainda apresentam diferenças consideráveis. Os valores do tratamento CTS são classificados de muito altos até à profundidade de 10 cm ( $> 200$  mg kg<sup>-1</sup>) e de altos (101 - 200 mg kg<sup>-1</sup>) na camada mais profunda (10-20 cm) (Santos, 2015). O tratamento STS exibe valores altos na camada superficial (0-3 cm), médios entre 3 e 10 cm e baixos na profundidade 10-20 cm (Santos 2015). Num estudo realizado por Pereira (2019), numa área próxima da presente área de estudo, foram encontrados valores de potássio similares aos registados no tratamento STS.

**Quadro 6** - Potássio extraível do solo ( $K_2O$ ) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Tratamento	Profundidade (cm)	$K_2O$ (mg $kg^{-1}$ )
(Tecnossolo)	0 – 5	1019,6
CTS	0 – 3	458,4a
	3 – 6	424,9a
	6 – 10	306,4a
	10 - 20	190,9a
	0 – 3	129,9b
STS	3 – 6	85,1b
	6 – 10	57,5b
	10 - 20	40,4b

O potássio contribui de forma significativa para a força osmótica potencial necessária para a absorção de água pelos sistemas radiculares das plantas. O deficiente funcionamento estomático devido à falta de potássio causa redução da taxa fotossintética e da eficiência do uso da água, podendo ser preocupante em regiões com elevado déficit hídrico durante a época estival (Sharma et al., 2005), como acontece na área de estudo.

## 4.2. Propriedades físicas do solo

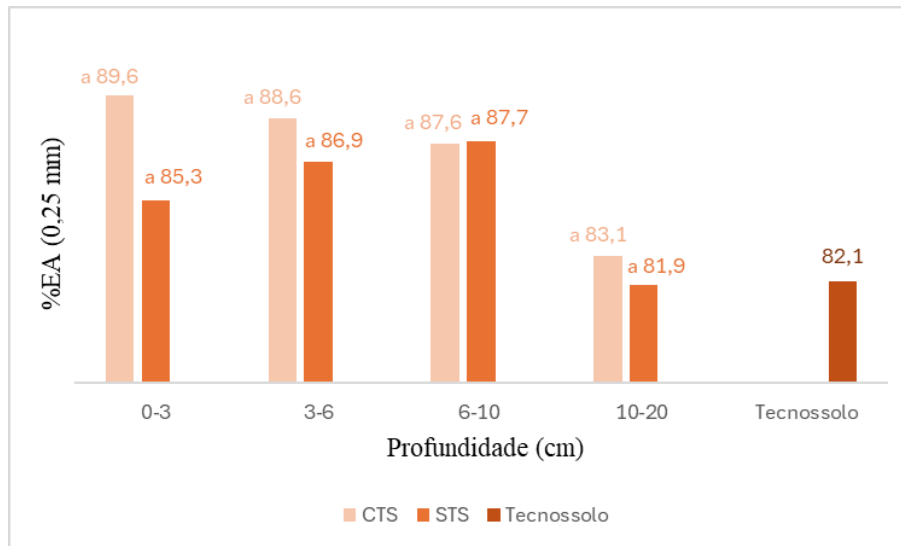
Para a análise da estabilidade dos agregados do solo, a densidade aparente e o teor de elementos grosseiros foram avaliados ao longo do perfil do solo (0-3, 3-6, 6-10, 10-20 cm). As restantes propriedades físicas (permeabilidade, porosidade, capacidade máxima para a água e capacidade de campo) foram apenas avaliadas na camada 0-5 cm, em ambos os tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo.

### 4.2.1. Estabilidade dos agregados do solo

Os agregados do solo são estruturas formadas pela associação de partículas inorgânicas, tais como areia, silte e argila, e materiais orgânicos (Jacto, 2019). A agregação, considerada como uma das principais formas de organização estrutural do solo, tem um papel fulcral na erodibilidade, já que é uma propriedade pouco estável no tempo e muito dependente das perturbações antrópicas relacionadas às práticas de gestão do solo (Figueiredo, 2015). Além disso, os agregados do solo possuem um papel fundamental em diversos processos, como a retenção de água e nutrientes, infiltração e aeração, visto que são os responsáveis pela existência dos poros no solo.

Na Figura 13 - Estabilidade dos agregados da classe 0,25 mm (%). em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra

nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ). é possível observar a estabilidade dos agregados da classe 0,25 mm. Ainda que os tratamentos não apresentem diferenças significativas, é consistente o aumento da estabilidade no tratamento CTS (com Tecno solo) ao longo do perfil.

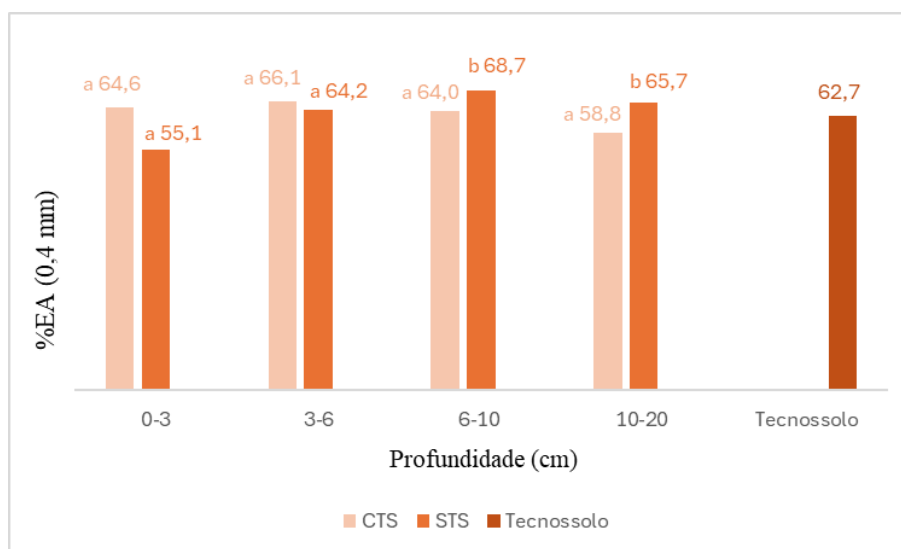


**Figura 13** - Estabilidade dos agregados da classe 0,25 mm (%). em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecno solo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

No trabalho realizado por Santos (2022), no qual foi avaliada a estabilidade de agregados na mesma área de estudo, porém para os períodos 2 e 7 meses pós-fogo, foi constatado que, quando analisada a classe 0,25 mm, a estabilidade dos agregados se mostrou superior, independentemente da profundidade, no tratamento onde foi adicionado o Tecno solo (CTS). Os resultados obtidos neste trabalho (27 meses pós-fogo) mantêm essa tendência de aumento e, estando a agregação relacionada com diversas propriedades do solo, pode-se inferir que o Tecno solo está a contribuir para a melhoria de indicadores da qualidade do solo.

Já para a classe 0,4 mm o comportamento foi diferente, com incrementos da estabilidade até aos 6 cm de profundidade (0-3 e 3-6 cm), apresentando uma redução significativa a partir daí (6-10 e 10-20 cm) no tratamento CTS (Figura 14). Ainda segundo o trabalho realizado por Santos (2022), para a classe 0,4 mm o que se observou foi o inverso, apresentando o tratamento STS (sem Tecno solo) uma maior percentagem de estabilidade dos agregados, independentemente da profundidade. Nesta fase do estudo (27 meses pós-fogo), pode-se observar que essa tendência está a inverter-se, mostrando as camadas mais superficiais (0-3 e 3-6 cm) do tratamento CTS estabilidade superior às

do tratamento STS.



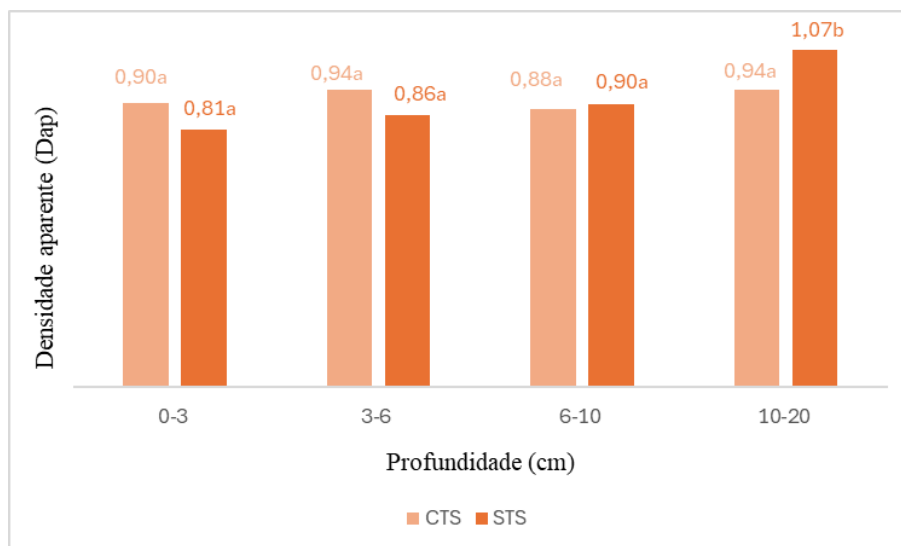
**Figura 14** - Estabilidade dos agregados da classe 0,4 mm (%) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Segundo Viana (2020), um solo com estrutura considerada boa é mais resistente aos impactos da precipitação e à ação de máquinas agrícolas. Esse tipo de solo tem maior capacidade de acumular água e ar, facilitando a penetração das raízes e permitindo a exploração de um volume maior de solo, o que aumenta o acesso a nutrientes e água. Com isso, evidencia-se que uma agregação boa do solo pode potencializar a produção vegetal, pelo favorecimento causado às raízes.

#### 4.2.2. Densidade aparente

A densidade aparente (Dap) é definida como a razão entre a massa de solo e o volume aparente que essa massa ocupa. O volume aparente inclui o volume real das partículas sólidas mais o volume ocupado pelos poros que, na sua arrumação, as partículas deixam entre si (Costa, 2018).

Por análise da Figura 15, é possível observar uma variação no padrão dos valores da Dap em profundidade. No tratamento STS, a Dap segue um padrão esperado, isto é, aumenta com a profundidade. Já para o tratamento CTS esse padrão sofreu algumas alterações, com tendência de aumento nas camadas superficiais (0-3 e 3-6 cm) e de redução nas camadas mais profundas (6-10 e 10-20 cm).



**Figura 15** - Densidade aparente do solo (Dap) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

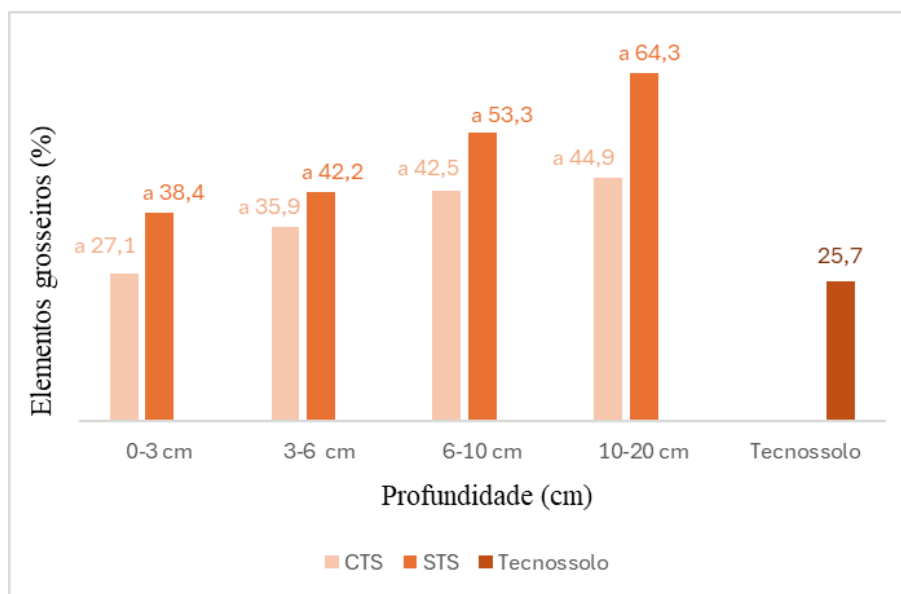
A Dap depende da textura do solo, assim como da agregação, porosidade e teor de matéria orgânica. Considera-se que valores adequados para solos arenosos podem variar de 1,2 a 1,9, enquanto para solos argilosos variam de 0,9 a 1,7 (Reinert & Reichert, 2006). Os solos com mais teor de matéria orgânica tendem a possuir valores mais baixos de Dap. Também, a Dap varia inversamente com o volume de poros, portanto, a Dap pode servir de indicador da porosidade do solo. Admite-se que valores de Dap superiores a 1,75 em solos de textura grosseira e 1,50 em solos de textura fina, correspondem a condições que impedem ou pelo menos dificultam o crescimento, desenvolvimentos e expansão dos sistemas radiculares das plantas (Porta et al., 2003). Os valores de Dap obtidos neste trabalho podem ser considerados relativamente baixos em ambos os tratamentos (CTS e STS), aparentemente sem causarem constrangimentos físicos no solo.

#### 4.2.3. Elementos grosseiros

A fração de elementos grosseiros de um solo inclui todas as partículas minerais com dimensões superiores a 2 mm, podendo influenciar algumas características, como a drenagem, retenção de água, aeração, porosidade, entre outras.

Ao observar a Figura 16, nota-se que o teor de elementos grosseiros nos tratamentos CTS e STS, embora sem diferenças estatisticamente significativas, aumenta em profundidade, sendo sempre mais baixo no tratamento CTS (com Tecnosolo). Os valores variam de 38,4 % (0-3 cm) a 64,3 % (10-20 cm) em STS e de 27,1 a 44,9 em CTS, para

as mesmas camadas, respetivamente. Esta redução pode ser devida à interferência do Tecnosolo nas reações químicas de meteorização da pedregosidade do solo.



**Figura 16** - Elementos grosseiros do solo (%) em função da profundidade nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Elevados teores de elementos grosseiros ( $> 25\%$ ) são comumente encontrados nos solos da bacia do Mediterrâneo, em geral, e especificamente no contexto regional da área de estudo (Figueiredo et al., 2015; Fonseca et al., 2022). A alta pedregosidade destes solos pode reduzir de forma significativa a erodibilidade, seja devido a cobertura da superfície que proporcionam, seja pelo aumento da rugosidade superficial do terreno, seja finalmente pelo acréscimo de permeabilidade devido à distribuição dos elementos grosseiros no perfil.

Segundo Figueiredo et al. (2015), os solos mais degradados do Nordeste de Portugal são os que apresentam espessura inferior a 30 cm (Leptosolos), com elevado risco potencial de erosão e pedregosidade elevada ou muito elevada (mais de 30 % de elementos grosseiros em volume). Também, Pires (2015) refere que o teor de elementos grosseiros é mais elevado em situações de solos degradados, visto que parte dos elementos finos foram removidos pela erosão, deixando os solos mais delgados e com uma maior concentração de elementos grosseiros na sua.

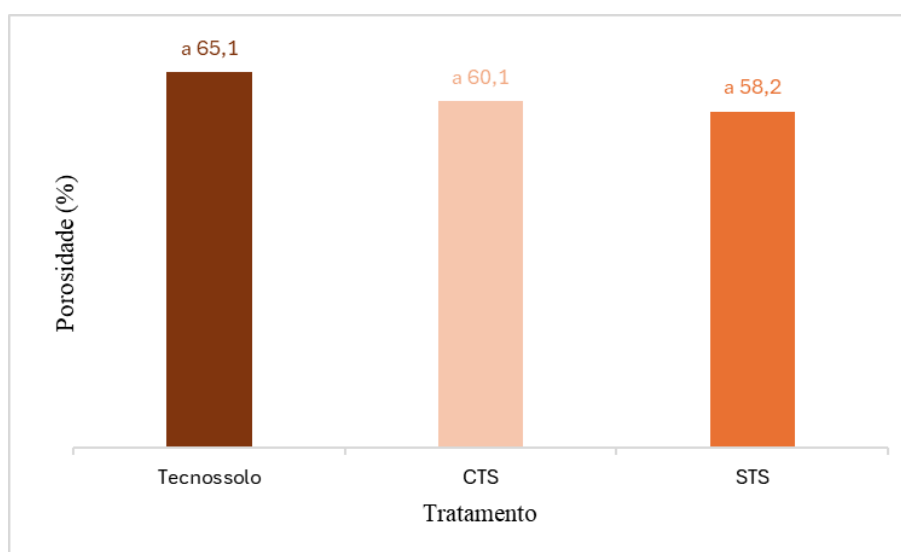
#### 4.2.4. Porosidade

A porosidade pode ser definida como a percentagem de volume do solo não

ocupado por partículas sólidas (Brady & Weil, 2010). A porosidade, tal como acontece com a densidade aparente, varia com a textura, estrutura e teor de matéria orgânica do solo.

Apesar dos valores de porosidade serem estatisticamente semelhantes entre os tratamentos CTS e STS, já é visível o efeito do Tecno solo (CTS) no incremento da porosidade (Figura 17). Estes valores de porosidade podem indicar que o Tecno solo está a criar condições mais favoráveis para as plantas, com uma maior capacidade para reter água, ar e nutrientes, favorecendo a infiltração e drenagem de água.

Na camada superficial de solos de textura grosseira, a porosidade regista valores que podem variar de 30-50%, enquanto nos de textura média a fina atinge 40-60%, podendo mesmo, no último caso, exceder os 60%, quando os solos são bem estruturados e com teores de matéria orgânica relativamente elevados (Costa, 2018). Os valores de porosidade registados (60,1 % CTS; 58,2 STS), são característicos de solos bem providos de matéria orgânica e relativamente bem estruturados, tendo-se verificado uma melhoria com a adição do Tecno solo na superfície.



**Figura 17** - Porosidade total do solo (%) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecno solo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

Proporcionar um ambiente ideal para o crescimento e desenvolvimento das plantas envolve o fornecimento de oxigénio através de um solo bem arejado e fornecimento de água através de uma capacidade de retenção e disponibilidade de água adequadas (Hasse, 2023). Para além de outros fatores, o conhecimento apenas da porosidade total não é suficiente para esclarecer questões relativas à retenção e circulação de água no solo e à

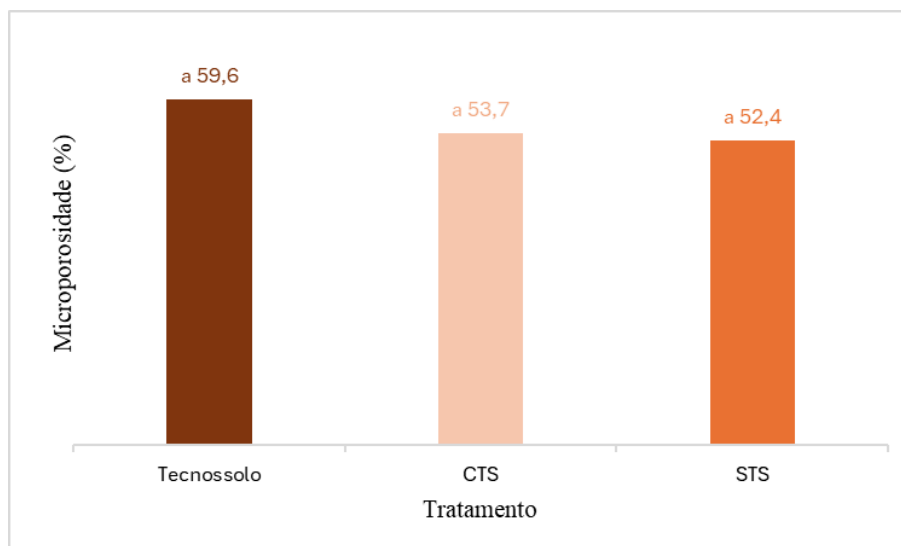
disponibilidade de oxigênio. Neste sentido, torna-se necessário distinguir entre microporosidade (microporos com dimensões inferiores a 0,05 mm) e macroporosidade (macroporos com dimensões superiores a 0,05 mm). Os primeiros são essenciais na retenção de água no solo e os últimos no arejamento do solo. Em qualquer solo é vantajosa a existência de uma proporção equilibrada dos dois tipos de poros (Porta et al., 2003). Sempre que a macroporosidade atinge valores inferiores a 5%, o arejamento do solo é insuficiente, podendo ocorrer asfixia radicular (Brady & Weil, 2010).

Os solos argilosos apresentam massas específicas globais menores e, portanto, maiores valores de porosidade total. Porém, quanto mais argiloso for o solo, mais predomina a microporosidade, dependendo também da agregação (Raij, 2011). Como a estrutura do solo influencia o formato da curva característica de humidade do solo principalmente na faixa de baixa sucção, podemos esperar que o efeito da compactação (que destrói a agregação), se traduza numa redução da porosidade, especialmente do volume de macroporos (Hillel, 2004).

#### **4.2.4.1. Microporosidade**

Segundo Bertol et al., 2019, os microporos, existentes principalmente no interior dos agregados do solo, desempenham um papel fundamental no armazenamento de água por capilaridade, sendo que uma maior presença de microporos pode aumentar a capacidade do solo de reter água e manter sua humidade.

A microporosidade segue o mesmo padrão da porosidade total, sem diferenças estatísticas entre tratamentos e ligeiramente superior no tratamento com Tecnosolo (CTS) (Figura 16). Mais uma vez os resultados demonstram e reforçam a atuação do Tecnosolo em propiciar uma melhoria e aumento na capacidade de armazenamento de água e nutrientes, bem como manter a humidade do solo, tornando-o mais benéfico para o desenvolvimento de plantas.

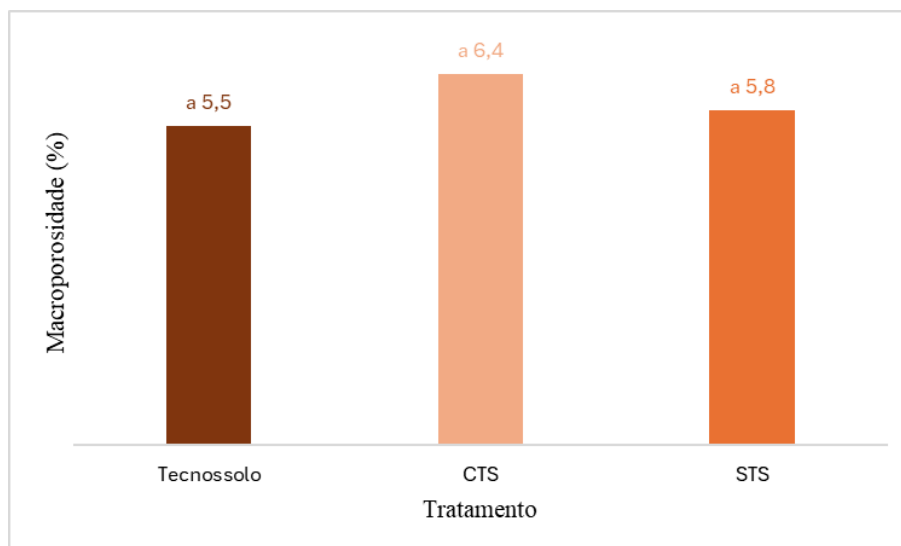


**Figura 18** - Microporosidade (%) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

#### 4.2.4.2. Macroporosidade

Os macroporos são constituídos principalmente pelos espaços criados entre agregados, e funcionam como as principais vias de infiltração e drenagem de água e de arejamento do solo. Quando expostos na superfície, os macroporos servem como vias para a rápida infiltração da água (Hillel, 2004), contribuindo para a redução do escoamento superficial e da perda de solo.

Para a macroporosidade (Figura 19), mantém-se a ausência de diferenças significativas entre tratamentos e o efeito positivo do Tecnossolo (CTS), com um aumento de 0,6 % da macroporosidade comparativamente ao tratamento STS. Os valores da macroporosidade são superiores ao limite mínimo indicativo (5%) e o tratamento CTS contribuiu para o aumento da disponibilidade de oxigênio favorecendo a atividade respiratória das raízes e dos microrganismos do solo e, conseqüentemente da biota do solo.

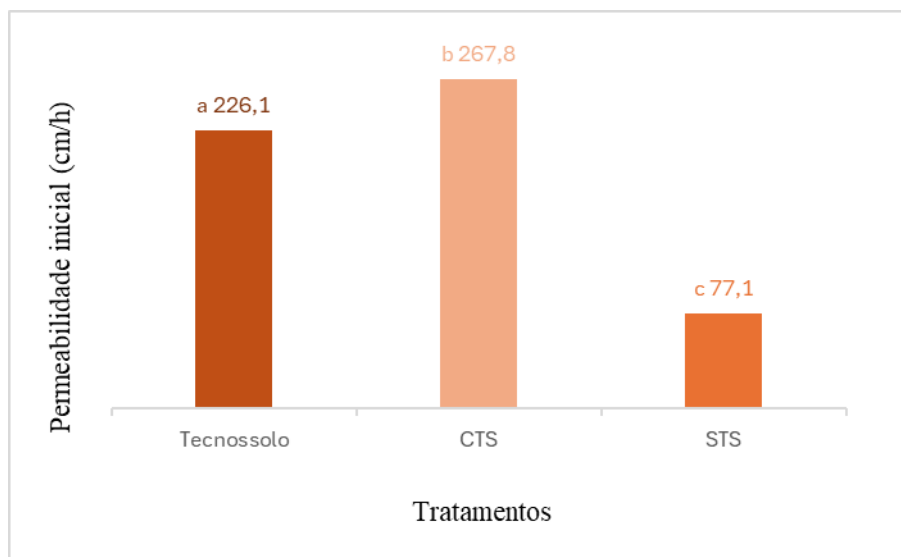


**Figura 19** - Macroporosidade (%) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

#### 4.2.5. Permeabilidade

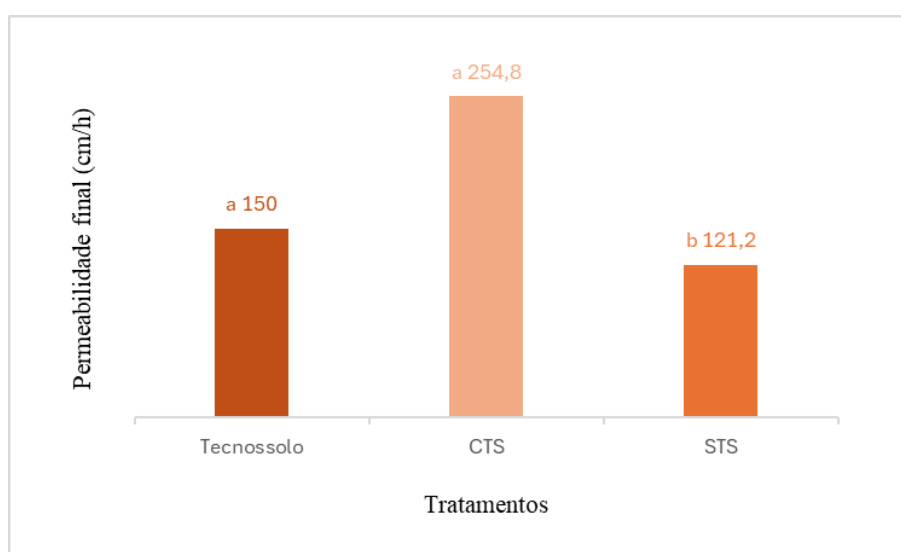
A permeabilidade de um solo pode indicar a capacidade que este possui para drenar ou conduzir a água (Figueiredo, 2011). Solos com teor mais elevado de argila apresentam uma maior retenção e disponibilidade de água, além de possuir maior capacidade de troca catiônica (CTC) e de capacidade de suprimento de nutrientes às plantas, em contrapartida, solos com quantidade reduzida de areia apresentam maior permeabilidade à água e ao ar, porém menor capacidade de reter água e nutrientes (Hasse, 2023). A permeabilidade do solo afeta diretamente a taxa de infiltração a qual impacta a capacidade máxima que um solo tem em possibilitar a entrada de água sob determinadas condições, interferindo com a dinâmica da água e com os processos erosivos do solo (Costa et al., 1999).

A permeabilidade inicial ( $K_i$ ) corresponde à primeira leitura realizada após a saturação das amostras no permeâmetro. A Figura 20 mostra uma  $K_i$  muito rápida ( $> 25,4$  cm/h) e significativamente superior no tratamento CTS em relação ao tratamento STS.



**Figura 20** - Permeabilidade inicial do solo ( $K_i$ ) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecno solo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

A permeabilidade final ( $K_f$ ), calculada a partir da média das três últimas leituras, continua a ser muito rápida ( $> 25,4$  cm/h) e significativamente superior no tratamento CTS (Figura 21).



**Figura 21** - Permeabilidade final do solo ( $K_f$ ) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecno solo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

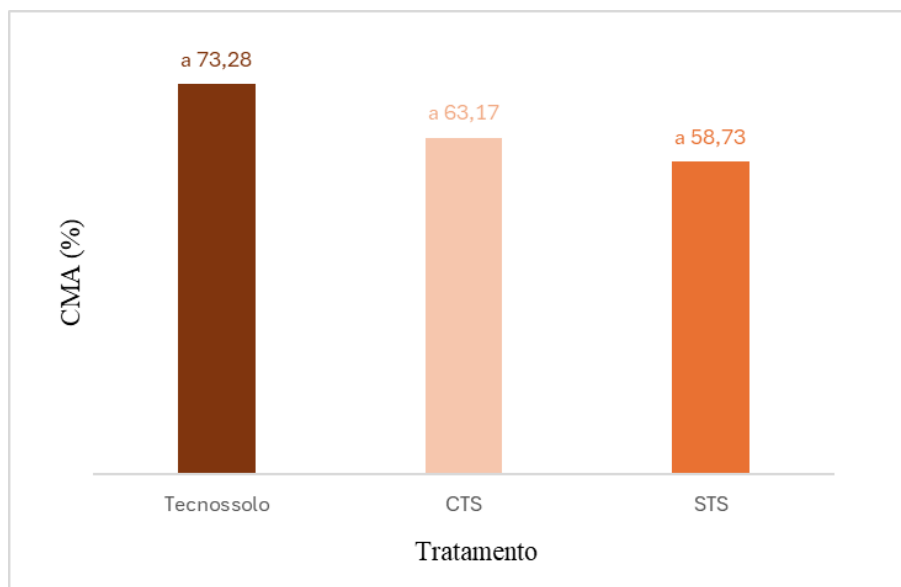
O aumento da permeabilidade, em concordância com o aumento da porosidade, nomeadamente da macroporosidade, contribui para aumentar a conservação do solo (aumento da taxa de infiltração e redução dos processos erosivos), mas também pode contribuir para a perda de nutrientes por lixiviação. Neste sentido, é importante que os solos sejam bem providos de colóides minerais (argila) e orgânicos (matéria orgânica),

para ajudar a manter os nutrientes no sistema. A redução da erosão do solo promove a manutenção destes constituintes quimicamente ativos (argila e matéria orgânica), resultando numa melhoria da qualidade e das funções produtivas e ecológicas do solo.

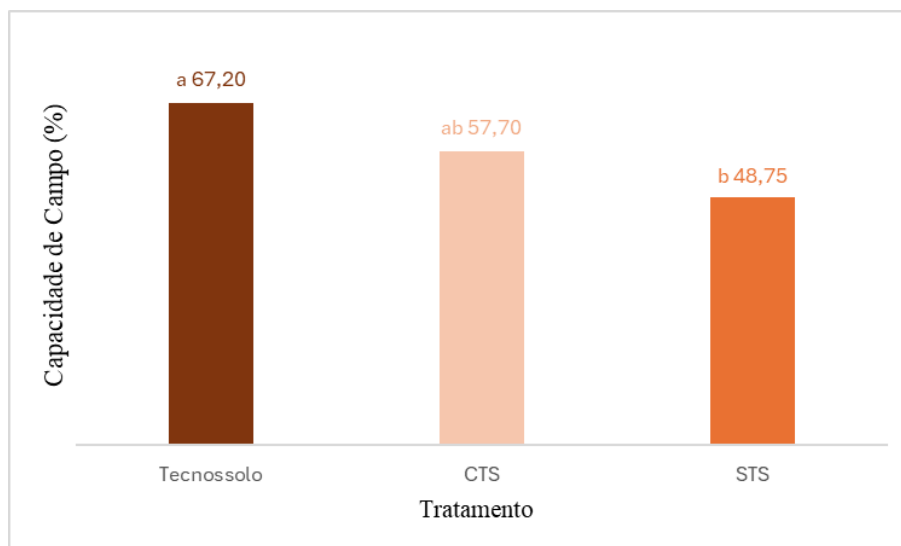
#### 4.2.6. Capacidade máxima para água e capacidade de campo

A capacidade máxima para a água (CMA) corresponde ao ponto em que o solo se encontra saturado, todos os poros (micro e macroporos) estão plenamente cheios de água, ficando em destaque a sua relação direta com a porosidade total do solo. A capacidade de campo (CC) pode ser definida como a capacidade máxima de um solo em reter água, acima da qual ocorrem perdas por percolação de água no perfil ou por escoamento superficial (McCauley, 2023). Quando atingido o limite do teor de água utilizável pelas plantas (CC), os microporos se encontram cheios de água. A CMA, bem como a CC tendem a aumentar à medida que o nível de matéria orgânica no solo também aumenta, entre outras razões devido à afinidade da matéria orgânica para a água (Piovesan, 2022).

A CMA (Figura 22) seguiu o padrão da porosidade total, registando-se um aumento estatisticamente não significativo no armazenamento de água no solo com aplicação do Tecnosolo (CTS). Relativamente à CC (Figura 23), o tratamento CTS também registou um aumento da retenção e disponibilidade de água para as plantas.



**Figura 22** - Capacidade máxima para a água (CMA) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnosolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).



**Figura 23** - Capacidade de campo (CC) na profundidade 0-5 cm nos tratamentos (CTS e STS) e no Tecnossolo. A utilização da mesma letra nos valores entre os tratamentos demonstra que não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ).

A CC é alvo de desacordo em diversos estudos de investigação, como aborda Hillel (2004), uma vez que as avaliações laboratoriais ainda não são capazes de replicar com exatidão a dinâmica solo-água, portanto, a capacidade de campo deveria ser medida diretamente no campo. Esta constatação pode explicar as discrepâncias encontradas entre a microporosidade e o teor de humidade na CC. Contudo, a rápida desaceleração da drenagem interna ou redistribuição da água no perfil do solo é uma propriedade extremamente importante dos solos, responsável por manter uma quantidade de humidade para as plantas sobreviverem durante os períodos entre chuvas ou irrigações.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o projeto piloto de uso de Tecnosolos na recuperação de áreas ardidas, mostram que a aplicação de Tecnosolo na superfície do solo (espessura média 5 cm), revelou-se como sendo um condicionador do solo promissor, registrando num período de 27 meses relevantes efeitos positivos em propriedades físicas e químicas do solo.

O aumento da microporosidade reforçou a retenção e a disponibilidade de água no solo, com reflexos expressivos na capacidade máxima para a água e na capacidade de campo, contribuindo para reduzir as carências hídricas durante o período estival, o que por sua vez favorece a produção de biomassa. Por outro lado, o acréscimo da macroporosidade beneficia o crescimento vegetal, bem como a biota do solo. Já o acréscimo da permeabilidade do solo, associado a melhores taxas de infiltração, favoreceu a recarga dos recursos aquíferos subterrâneos e a conservação do solo e da fertilidade do solo (redução dos processos erosivos do solo).

A acidez do solo diminuiu consideravelmente, traduzindo-se numa maior disponibilidade de nutrientes para as plantas e em menores efeitos tóxicos no solo, bem como numa atividade biológica do solo mais ativa. Este benefício parece ter estimulado ligeiramente a mineralização da matéria orgânica, mas sem efeitos significativos. Os teores de fósforo e potássio extraíveis atingiram valores elevadíssimos no solo, o que estará diretamente relacionado com a formulação do Tecnosolo, tendo funções importantes no solo nesta fase inicial de recuperação das áreas ardidas.

A aplicação de Tecnosolo para recuperação de áreas ardidas demonstrou ter efeitos que já são notavelmente visíveis em indicadores da qualidade do solo e, que se estão traduzindo na recuperação das funções produtivas e ambientais do solo. A monitorização do ensaio vai prosseguir e vão ser realizadas novas avaliações em março de 2025.

## 6. REFERÊNCIAS

- Agroconsultores & Coba (1991). **Carta dos Solos do Nordeste de Portugal**. UTAD, Vila Real.
- Ahmetović M., Keran H., Šestan I., Odobašić A., Čanić A., Junuzović H. & Hrnjić N. (2020). **Influence of the Spreča Riverflooding on individual physicochemical parameters of soil**. *Inter-national Journal for Research in Applied Sciences and Biotech-nology*, 7: 13-18.
- Allison, S. D. & Martiny, J. B. (2008). **Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(supplement\_1), 11512-11519.
- Andreoli C. V., Andreoli, F. D. N. & Justi Junior, J. (2014). **Formação e características dos solos para o entendimento de sua importância agrícola e ambiental**. Complexidade: redes e conexões do ser sustentável. 1ed. Curitiba: SENAR/PR, 511-530.
- Ashaq, M., Singh, H. S., Patra, H., Sahu, T. K. & Bharathi, K. (2024). **Chemical properties of soil**. In Chapter 4 (ISBN: 978-81-975042-6-6).
- Balasubramanian, A. (2017). **Chemical Properties of Soils**.
- Balbino, L. R. (1968). **La méthode Egner-Riehm et la détermination du phosphore e du potassium «assimilável» des sols du Portugal**. II Col. Eur: Maditerrânico Contrl. Fert. Plantas Cultivadas: 55-65, Sevilha.
- Benhalima, Y., Santos, E., Arán, D., Fonseca, M., Abreu, M. M., Duarte, I. & Rego, F. (2022). **Preliminary evaluation of physical characteristics of soils from Mediterranean cork oak forests: post fire long term assessment**. *Revista de Ciências Agrárias* 45(4), 1171-1180.
- Bento-Gonçalves, A. & Vieira, A. (2021). **A investigação geográfica dos incêndios florestais em Portugal–Luciano Lourenço o grande impulsionador**. Technical report, Universidade do Minho.
- Bertol, I., Maria, I. C. & Souza, L. S. (2019). **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. 1ª ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

- Bompastor, Alice; Figueiredo, Tomás de; Fonseca, Felícia. **Matos do Parque Natural de Montesinho, NE de Portugal: produção de serviços ecossistémicos.** In: 15º Congresso da APDR. APDR, 2009. p. 338-364.
- Bessou, C. & Marichal, R. (2015). **Soil fertility, evolving concepts and assessments.** ACIAR.
- Bot A. & Benites J. (2005). **The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food and production.** Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Rome.
- Brady, N. C. & Weil, R. R. (2010). **Elements of the nature and properties of soils** (3rd ed.). Pearson
- Carvalho, M. (2019). **A importância da matéria orgânica do solo na produção agrícola e o papel dos adubos orgânicos.** Agrotec, Ed. N°30, 2-4.
- Castro, A. C. M.; Meixedo, J. P.& Vivas, A. (2010). **Avaliação do impacto do fogo controlado na vulnerabilidade dos solos florestais – uma contribuição.** Centro de Investigação em Geo-Ambiente e Recursos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). p. 26-28.
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., von Maltitz, G. (Eds.) (2018). **World Atlas of Desertification, Publication Office of the European Union, Luxembourg.**
- Coelho, M. R., Fidalgo, E. C., dos Santos, H. G., Brefin, M. D. L. M.S. & Pésez, D. (2013). **Solos: tipos, suas funções no ambiente, como se formam e sua relação com o crescimento das plantas.** CARES, Juvenil Enrique; ZANETTI, Ronald.
- Costa, J. B. (2018). **Caracterização e constituição do solo.** 9ª Edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Costa, R. P. (2018). **Densidade aparente e suas influências no manejo do solo.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42(3), 210-225. <https://doi.org/xxxx>
- Costa, E. L. D., Silva, A. M. D., Colombo, A. & Abreu, A. R. D. (1999). **Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 3(2), 131-134.
- FAO (2023). **Agência Internacional de Energia Atômica renova mandato para**

**missão de segurança em Zaporizhzhia.** ONU News.  
<https://news.un.org/pt/story/2023/12/1824382>

Ferreira, C. P., Cravo, M. S. & Ferreira, E. V. O. (2020). **Fertilizantes minerais.** In E. C. Brasil, M. S. Cravo, & I. J. M. Viégas (Eds.), *Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará (2ª ed., revista e atualizada)*. Embrapa.

Freitas, D. A. (2018). **Estabilidade da agregação em áreas ardidadas e não ardidadas no Nordeste de Portugal: um importante indicador da qualidade do solo.** Master's Thesis, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.

Figueiredo, T. (2015). **Proteção do solo em viticultura de montanha: manual técnico para a região do Douro.**

Figueiredo, T. (2011). **Determinação laboratorial da condutividade hidráulica do solo e Realização de exercícios sobre exploração de aquíferos.** Mestrado em Tecnologia Ambiental. Escola Superior Agrária de Bragança.

Figueiredo, T. de, Fonseca, F., Nunes, L. (2015). **Proteção do Solo e combate à desertificação.** Escola Superior Agrária, Bragança.

Freitas, A. D. L., Vital, A. D. F. M., Nascimento, B. M. S., Lustosa, M. A. F. S., de Souza, M. P. & Ramos, G. G. (2018). **Percepções sobre a importância do solo: Estudo de caso em uma escola de Itapetim–PE.**

Fonseca, F., Figueiredo, T., Nogueira, C. & Queirós, A. (2017). **Effect of prescribed fire on soil properties and soil erosion in a Mediterranean mountain area.** *Geoderma* 307, 172-180.

Fonseca, F., Figueiredo, F., Vilela, A., Santos, R., Carvalho, A.L., Eliane, A. & Nunes, L. (2019). **Impact of tree species replacement on carbon stocks in a Mediterranean mountain area, NE Portugal.** *Forest Ecology and Management* 439, 181-188.

Fonseca, F., Silva, D., Bueno, P., Hernández, Z., Royer, A.C. & Balasubramanian Figueiredo, T. (2022). **Temporal dynamics of carbon storage in mountains shrub areas managed by prescribed fire.** *Catena* 212, 106107.

Fonseca, F. et al. (2020). **Efeito do fogo controlado em áreas de matos na dinâmica do armazenamento do carbono no Parque Natural de Montesinho, NE Portugal.** In: V Congresso Internacional de Riscos “Contributos da ciência para a redução do

risco. Agir hoje para proteger o amanhã “. RISCOS–Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança.

Gomes, P. R. (2012). **Incêndios e detidos por crime de incêndio florestal em Portugal**. Master’s Thesis, Universidade do Minho, Portugal.

Hasse, D. (2023). **Impactos da colheita mecânica de azeitona nas propriedades físicas do solo, NE Portugal**. Master’s Thesis, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.

Hillel, D. (2004). **Introduction to environmental soil physics**. Elsevier.

Honrubia, M., Torres, P., Díaz, G. & Cano, A. (1992). **Manual para micorrizar plantas em viveiros forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. ICONA**.

ICNF, Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. (n.d.). **“Parque Natural de Montesinho”**. ICNF.

<<https://www.icnf.pt/conservacao/rnapareasprotegidas/parquesnaturais/pnmontesinho>>

ICNF, **Incêndios rurais: Áreas ardidas e ocorrências**. <<https://www.icnf.pt/florestas/gfr/gfrgestaoinformacao/grfrelatorios/areasardidaseocorrencias>>

IUSS Working Group WRB. (2007). **World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007**. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.

JACTO. **Agregados do solo: saiba como promover um solo mais fértil na lavoura!** Disponível em: <https://blog.jacto.com.br/agregados-do-solo-entenda-o-que-sao-e-por-que-aestabilidade-importa/>.

Leite, F. F., Gonçalves, A. B., Lourenço, L., Úbeda, X. & Vieira, A. (2013). **Grandes incêndios florestais em Portugal Continental como resultado das perturbações nos regimes de fogo no mundo mediterrâneo**. Silva Lusitana, nº Especial, 129-144.

Lima, V. C. & Lima, M. R. (2007). **Formação do solo**. Universidade Federal do Paraná.

Lopes, T. A. (2020). **Tecnossolos elaborados com resíduos da construção civil: potencial para a recuperação de áreas degradadas**. Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo, Brasil.

McCauley, B. (2023). **An Auto-netnographic Approach to Understanding Alternate Gaming Accounts: How Smurfing Impacts the Prosumer Experience in**

- Counter-Strike: Global Offensive.** Journal of Electronic Gaming and Esports, 1(1).
- Macías-Vásquez, F. & Macías-García F. (2021). **Aplicación de tecnosolos a la carta en a rehabilitacion de espáacios mineros de la Península Ibérica.** Simpósio: Uso de Tecnossolos na construção de solos produtivos, Brasil.
- Magalhães, A. C. et al. (2015). **A importância dos solos para o ecossistema.** AGPTEA. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/solos/artigos/A%20IMPORTANCIA%20DOS%20SOLOS%20PARA%20O%20ECOSSISTEMA.pdf>
- Mandal (2016)., Uttam Kumar. **Soil physical and chemical properties in relation to conservation of natural resources.**
- Mattos, B. S., Bertolino, A. V. F. A. & Bertolino, L. C. (2022). **A influência do fogo nas propriedades de um solo sob manejo de agricultura de corte e queima em ambiente serrano no bioma de Mata Atlântica.** Sociedade & Natureza, 34.
- Mclean, E.O. (1982) **Soil pH and Lime Requirement.** In: Page, A.L., Ed., Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, 199-224.
- Meira Castro, A. C., Meixedo, J. P. & Vivas, A. (2010). **Avaliação do impacto do fogo controlado na vulnerabilidade dos solos florestais—uma contribuição.**
- Neves, A. F. F. (2015) **Técnicas de análise laboratorial para solos, material vegetal e corretivos orgânicos.** Dissertação, Universidade do Minho, 150 p.
- Nogueira, C. D. C. F. (2014). **Efeito do fogo controlado em propriedades químicas do solo em áreas de montanha sob coberto de matos: o caso de Aveleda, Parque Natural de Montesinho.** Master's thesis, Instituto Politecnico de Braganca, Portugal.
- Nogueira, C., Fonseca, F. & Figueiredo, T. (2015). **Avaliação temporal do efeito do fogo controlado em propriedades químicas do solo, em áreas de montanha com matos.** Livro de Atas do Encontro Anual das Ciências do Solo, 30-37.
- Park, A., 2015. **Carbon storage and stand conversion in a pine-dominated boreal forest landscape.** Forest Ecology and Management 240, 70-81.
- Patrício, M.B., Lado, M., Figueiredo, T., Azevedo, J.C., Bueno, P.A.A. & Fonseca, F. (2023). **Carbon Storage Patterns and Landscape Sustainability in Northeast**

- Portugal: A Digital Mapping Approach.** Sustainability 15, 16853.
- Percival, H. J., Parfitt, R. L. & Scott, N. A. 2000. **Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: Is clay content important?** Soil Sci. Soc. Am. J. 64, 1623-1630.
- Pereira, D. (2018). **Efeitos dos incêndios florestais de baixa severidade nos solos, no município de Fafe.** Master's thesis, Instituto de Ciências Sociais da Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Pereira, R. M. F. D. O. & Giglio, D. (2016). **Uso do fogo controlado em vegetação e combate aos incêndios florestais: panorama do código florestal de 2012.** XXV Congresso do CONPEDI - Conselho Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Direito, Ed. 25, (978-85-5505-299-6).
- Pereira, M. G., dos Anjos, L. H. C., Pinheiro Junior, C. R., Pinto, L. D. S., da Silva Neto, E. C. & Fontana, A. (2019). **Formação e caracterização de solos.**
- Pereira, K. (2019). **Propriedades físico-químicas de solos com diferentes teores de matéria orgânica nas regiões de montanha no nordeste de Portugal.** Master's thesis, Instituto Politecnico de Braganca, Portugal.
- Pereira, R. M. F. D. O., & Giglio, D. (2016). **Uso do fogo controlado em vegetação e combate aos incêndios florestais: panorama do código florestal de 2012.** XXV Congresso do CONPEDI - Conselho Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação Em Direito, Ed. 25, (978-85-5505-299-6).
- Piovesan, E. D. L. (2022). **Efeitos de curta duração do fogo controlado em propriedades e processos físicos do solo: um exemplo em áreas de matos do Parque Natural de Montesinho.** Master's thesis, Instituto Politecnico de Braganca, Portugal.
- Pires, A. S. (2015). **Pedregosidade como indicador do estado de degradação física do solo: comparação entre solos climáticos e solos degradados.** Master's thesis, Instituto Politecnico de Braganca, Portugal.
- Porta, J. C., López-Acevedo, M. R. & Roquero L. C. (2003). **Edafología para la agricultura y el medio ambiente.** (3.<sup>a</sup> ed.) Madrid: Mundi-Prensa. 961 p. ISBN: 1-4492-8686-0.
- Raij, B. (2011). **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes.** 1<sup>a</sup> ed. Piracicaba:

International Plant Nutrition Institute (IPNI).

Redin, M., Santos, G. D. F. D., Miguel, P., Denega, G. L., Lupatini, M., Doneda, A. & Souza, E. L. D. (2011). **Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo**. *Ciência Florestal*, 21(2), 381-392.

Reinert, D. & Reichert, J. M. (2006). Reinert & Reichert - **Propriedades físicas do solo**.

Rodrigues, M. A. & Coutinho, J. F. (1995). **Eficiência da utilização do azoto pelas plantas**. Série Estudos, Instituto Politécnico de Bragança.

Royer, A. C., Figueiredo, T. & Fonseca, F. (2021). **O fogo e os solos em territórios de montanha do NE de Portugal: Livro-Guia da Visita Técnica**. Coimbra: RISCOS. ISBN 978-989-9053-10-6

Santos, J.Q. (2015). **Fertilização, Fundamentos agroambientais da utilização dos adubos e correctivos**. Publindústria, Lisboa.

Santos, I. N. (2022). **Impacto do Fogo Controlado na Estabilidade da Agregação do Solo em Áreas de Matos do Parque Natural de Montesinho, NE Portugal**. Master's Thesis. Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.

Sharma. K. L., Mandal, U. K., Srinivas, K., Vittal, K. P. R., Mandal, B., Grace, J. K. & Ramesh, V. 2005. **Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol**. *Soil & Tillage. Research* 83, 246-259.

Simões, O. (Ed) (2018). **O rural depois do fogo**. Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Coimbra (ESAC/IPC), Coimbra. ISBN: 978-972-99205-8-5.

Teixeira, C. & Vieira, S. (2011). **Solo na escola: uma metodologia de educação ambiental no ensino fundamental**. Fundação Educacional de Divinópolis, Minas Gerais: Funedi/UEMG.

Teixeira, B. (2021). **Caracterização de solos sujeitos a incêndios**. 2021. Master's Thesis. Universidade do Minho (Portugal).

Teixeira, R. C., de Azevedo Rocha, P., Machado, H. A., de Faria, A. L. L. & da Costa, L. M. (2022). **Solos Antropogênicos: solos decorrentes da ação humana em perspectiva ao Antropoceno**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(1), 107-122.

Van Reeuwijk, L.P. (2002). **Procedures for soil analysis**. 6th ed ISRIC. FAO.

Viana, J. M. M. L. (2020). **Mobilização do solo - Manual do Formador**. Disponível em:  
<https://jovemagricultor.azores.gov.pt/noticia.aspx?f=30&t=4&i=62>

Vieira, R. F. (2017). **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. EMBRAPA, Brasil.

Voitena, R. (2024). **The potential of soil conditioners on the recovery of burnt soils in the Montesinho Natural Park**. Master's thesis, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.