



**IMPACTOS NO SOLO DA APLICAÇÃO DE FOGO PRESCRITO:  
AVALIAÇÕES EM CONDIÇÕES REAIS E SIMULADAS EM  
PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E BIOLÓGICAS DO SOLO**

**RODRIGO FAVARO BRAGA**

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 Federal do Paraná – campus Londrina

Orientado por

**Tomás de Figueiredo**

**Felícia Fonseca**

**Marcelo Eduardo Freres Stipp**

**Bragança**

**2023**

**IMPACTOS NO SOLO DA APLICAÇÃO DE FOGO PRESCRITO: AVALIAÇÕES EM  
CONDIÇÕES REAIS E SIMULADAS EM PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E  
BIOLÓGICAS DO SOLO**

Rodrigo Favaro Braga

Tomás de Figueiredo (IPB)

Felícia Fonseca (IPB)

Marcelo Eduardo Freres Stipp (UTFPR)

Bragança, março de 2023

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus, por ter me dado tudo o que tenho hoje em dia, como a minha família, meus amigos, a oportunidade de realizar esta dupla diplomação e a força de vontade para sempre buscar o que traz paz. Sem Ele, eu nada seria.

Sou grato pela minha família. Pela minha mãe por ser meu exemplo e o amor absurdo que demonstra por mim, obrigado por tudo mãe, meu pai por todo o amor e carinho imenso, minha avó por ter feito da sua casa a minha, em específico durante a graduação, além de todo seu amor, meu irmão Leandro, que do seu jeitinho, me ensina muito e minha prima Sophia, por ser minha companheira infalível.

Agradeço ao professor Tomás de Figueiredo, que por além de ser um ótimo orientador, me inspira com a pesquisa, tem grande paciência para me transmitir seu conhecimento e pelas oportunidades que me forneceu durante este ano de trabalho. Agradeço a professora Kátia Prates que por meio da iniciação científica que realizei com ela, me trouxe novamente a vontade de seguir a vida acadêmica e me incentivou a realizar a dupla diplomação.

Agradeço o meu grupo de pesquisa durante o mestrado, o laboratório de solos, sem vocês este trabalho não teria acontecido, em específico a Ana Royer por toda a ajuda, parceria, paciência e disponibilidade.

Agradeço ao sistema de educação brasileiro, por fornecer um ensino superior gratuito e de ótima qualidade. Agradeço também a todos os demais professores que transmitiram seus conhecimentos ao longo da minha graduação.

Agradeço então os meus amigos, por serem os melhores que eu poderia ter, como a Ramily que me acompanhou de perto desde o início da graduação até agora no mestrado, a Ana Paula, Ana Guedes e todos os demais que estiveram perto fisicamente durante o desenvolvimento deste mestrado, sem vocês essa experiência não seria tão boa como foi, tenho certeza.

Agradeço meus amigos que mesmo na distância física se fizeram presente e me apoiaram sempre, como os que fiz na graduação, a Fernanda, Letícia, Elana, Basima e Catarine, que ficarão para sempre na minha vida, obrigado por todos os momentos que temos juntos. Grato pelas minhas amigas de vida, Victória e Izana, por me acompanharem em todas as fases. Sou muito grato também pelo Alex Cunha, que me incentiva em todas as oportunidades e sempre torce por mim, você é absurdamente importante.

A minha graduação em conjunto com a dupla diplomação foi uma experiência transformadora, de muito trabalho, aprendizado e vivências, são muitas memórias. Sei que sozinho não teria chegado até aqui, então obrigado a todas as pessoas que de alguma forma passaram por mim, mesmo que não tenham sido citadas aqui.

## RESUMO

O solo é um recurso fundamental para a vida na terra e as pressões humanas neste recurso estão atingindo níveis críticos, fazendo-se necessário à sua gestão para desenvolver seu uso sustentável. As ações humanas que causam impactos no solo são diversas e incluem o desmatamento, urbanização e incidência de incêndios. O fogo é um evento natural de longa ocorrência histórica, que existe antes da presença humana e possui grande influência na evolução de diversos seres vivos. Os efeitos do fogo no solo dependem da sua severidade, que é determinada pela duração e intensidade do fogo. Os incêndios florestais, que são focos de fogo intenso, não controlado, iniciados em arbustos ou florestas, por ações humanas ou não, podem resultar em perdas materiais, destruições totais de ecossistemas, mortes de seres vivos e mudanças drásticas nas funções estruturais do meio ambiente. O fogo prescrito é uma técnica de aplicação do fogo, em condições ambientais adequadas, utilizada para prevenir os incêndios florestais, por meio da redução do nível de combustível, minimizando a extensão, frequência e severidade dos fogos indesejados. Para avaliar a eficiência desta técnica, nos ensaios experimentais conduzidos neste trabalho analisaram-se propriedades físicas, químicas e biológicas do solo antes e depois do fogo prescrito, dando enfoque especial à resposta biológica do solo ao fogo medida através da taxa de troca de CO<sub>2</sub>. O estudo abrangeu duas áreas experimentais distintas. Uma em que se acompanhou a realização de um fogo prescrito no campo, comparando as médias das taxas de respiração do solo antes (3,34 μmol/m<sup>2</sup>s) e 12 horas depois (1,22 μmol/m<sup>2</sup>s) da aplicação do fogo prescrito. Na segunda, sujeita a fogo prescrito há dois anos, coletou-se monólitos de solo, utilizados para simular duas intensidades de fogo diferentes em laboratório. Os resultados laboratoriais obtidos para a respiração do solo, foram ainda comparados com medições em campo nesta segunda área experimental efetuadas em solo queimado e tratado após distúrbio, solo queimado e não tratado, e solo não queimado – controle, que obtiveram os valores de 3,64, 0,82 e 1,15 μmol/m<sup>2</sup>s, respectivamente. As diferentes intensidades de fogo simulado não resultaram em diferença significativas na taxa de respiração do solo, medidas até uma semana após o fogo (p valor > 0,05). As medições de campo mostraram efeitos ainda notórios dois anos após fogo de baixa intensidade, nos valores de respiração do solo, parâmetro muito sensível às perturbações resultantes da passagem do fogo sobre o solo. O fogo prescrito pode ser uma alternativa importante e de baixo impacto para o controle dos grandes incêndios florestais. Porém, haverá necessidade de aprofundar o estudo sobre os seus efeitos a longo prazo e em várias funções ecossistêmicas do solo.

**Palavras-chave:** respiração do solo, fogo de baixa intensidade, matéria orgânica, biomassa.

## ABSTRACT

Soil is a fundamental resource for life on earth and the human pressures on this resource are reaching critical levels, evidencing the necessity to manage it in order to develop its sustainable use. Human actions that impact the soil are diverse and include deforestation, urbanization and the incidence of fires. Fire is a natural event of long historical occurrence, which exists before human presence and has great influence on the evolution of several living beings. The fire effects on the ground depend on its severity, which is determined by the duration and intensity of the fire. Forest fires, which are outbreaks of intense, uncontrolled fire, started in bushes or forests, by human actions or not, can result in material losses, total destruction of ecosystems, death of living beings and drastic changes in the structural functions of the environment. Prescribed fire is a fire application technique, under appropriate environmental conditions, used to prevent forest fires by reducing the fuel level, minimizing the extent, frequency and severity of unwanted fires. In order to evaluate the efficiency of this technique, in this study's experimental work, physical, chemical and biological properties of the soil were analyzed before and after the prescribed fire, giving special focus to the biological response of the soil to fire, measured through the net CO<sub>2</sub> exchange rate. The study covered two distinct experimental areas. One in which a prescribed fire was carried out in the field, comparing the average soil respiration rates before (3,34 μmol/m<sup>2</sup>s) and 12 hours after (1,22 μmol/m<sup>2</sup>s) applying the prescribed fire. In the second, subject to prescribed fire two years ago, soil monoliths were collected and used to simulate, in laboratory, two different fire intensities. The laboratory results obtained for soil respiration were also compared with measurements in the field in this second experimental area, carried out on burned and treated soil after disturbance, burned and untreated soil, and unburned soil – control, that had the values of 3,64, 0,82 and 1,15 μmol/m<sup>2</sup>s, respectively. The different simulated fire intensities did not result in significant differences in the soil respiration rate, measured up to one week after the fire (p value > 0,05). Field measurements showed noticeable effects, even after two years of a low-intensity fire, on soil respiration values, a parameter that is very sensitive to disturbances resulted from the passage of fire over the soil. Prescribed fire might be an important and low impact alternative to controlling wild forest fires. However, there will be a need to deepen the study on its long-term effects and on various soil ecosystem functions.

**Keywords:** soil respiration, low intensity fire, organic matter, biomass.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO.....</b>	<b>2</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
3.1 A IMPORTÂNCIA DO SOLO.....	3
3.2 PROPRIEDADES DO SOLO .....	5
3.2.1 Propriedades físicas do solo .....	5
3.2.2 Propriedades químicas do solo.....	6
3.2.3 Propriedades biológicas do solo.....	6
3.2.4 Matéria orgânica do solo .....	6
3.3 USO DO SOLO EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	7
3.3.1 Composição florestal de Portugal continental.....	8
3.4 DEGRADAÇÃO DO SOLO .....	10
3.5 INCÊNDIOS FLORESTAIS .....	11
3.5.1 Incêndios florestais em Portugal .....	12
3.6 IMPACTOS DO FOGO NO SOLO .....	15
3.6.1 Impactos do fogo nas propriedades físicas do solo .....	15
3.6.2 Impactos do fogo nas propriedades químicas do solo.....	16
3.6.3 Impactos do fogo nas propriedades biológicas do solo.....	16
3.7 CONTROLE DE INCÊNDIOS .....	17
3.8 FOGO PRESCRITO .....	19
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
4.1 APLICAÇÃO DO FOGO PRESCRITO .....	21
4.1.1 Área de estudo.....	21
4.1.2 Procedimentos de campo.....	23

4.1.2.1 Fogo prescrito.....	23
4.1.2.2 Parcelas e plano de amostragem .....	24
4.1.2.3 Recolha das amostras em campo.....	25
4.1.2.4 Análise biológica do solo .....	26
4.1.3 Procedimentos laboratoriais .....	28
4.1.3.1 Elementos grosseiros.....	28
4.1.3.2 Permeabilidade .....	29
4.1.3.3 Densidade aparente .....	30
4.1.3.4 Capacidade máxima para água e capacidade de campo .....	31
4.1.3.5 Porosidade, micro e macro porosidade .....	31
4.1.3.6 Análise da vegetação.....	31
4.1.3.7 Matéria orgânica.....	33
4.1.3.8 pH.....	34
4.1.3.9 Condutividade elétrica .....	34
4.2 SIMULAÇÃO DO FOGO.....	35
4.2.1 Área de estudo.....	35
4.2.2 Procedimentos de campo.....	36
4.2.2.1 Parcelas e plano de amostragem .....	36
4.2.2.2 Coleta dos monólitos de solo .....	37
4.2.3 Procedimentos laboratoriais .....	37
4.2.3.1 Simulação do fogo.....	37
4.2.3.2 Análise biológica do solo .....	39
4.3 COMPARAÇÃO DO CAMPO COM A SIMULÇÃO .....	40
4.3.1 Procedimentos de campo.....	40
4.3.1.1 Parcelas e plano de amostragem .....	40

4.3.1.2 <i>Análise biológica do solo</i> .....	41
4.4 TRATAMENTO DE DADOS .....	42
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>
5.1 RESULTADOS DO FOGO PRESCRITO .....	43
5.1.1 Análise de variância (ANOVA) .....	43
5.1.2 Propriedades físicas.....	44
5.1.2.1 <i>Elementos grosseiros</i> .....	44
5.1.2.2 <i>Humidade</i> .....	45
5.1.2.3 <i>Permeabilidade</i> .....	45
5.1.2.4 <i>Densidade aparente</i> .....	46
5.1.2.5 <i>Capacidade máxima para água e capacidade de campo</i> .....	46
5.1.2.7 <i>Porosidade, microporosidade e macroporosidade</i> .....	47
5.1.3 Análise da vegetação .....	48
5.1.4 Propriedades químicas .....	49
5.1.4.1 <i>pH</i> .....	49
5.1.4.2 <i>Condutividade elétrica</i> .....	50
5.1.4.3 <i>Matéria orgânica</i> .....	51
5.1.5 Respiração do solo .....	52
5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO FOGO E COMPARAÇÃO COM O CAMPO ..	52
5.2.1 Análise de variância (ANOVA) .....	52
5.2.2 Respiração do solo .....	52
5.2.3 Comparação da respiração do solo entre o campo a simulação .....	53
5.3 DISCUSSÃO .....	54
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>64</b>

<b>ANEXOS.....</b>	<b>75</b>
ANEXO I – GUIA DE COBERTURA VEGETAL .....	75

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Percentagem representativa do uso do solo em Portugal Continental. ....	7
<b>Figura 2:</b> Distribuição das principais espécies presentes nas florestas de Portugal continental. ....	9
<b>Figura 3:</b> Estrutura do índice meteorológico de risco de fogo - FWI. ....	14
<b>Figura 4:</b> Fogos nos países localizados na região do Mediterrâneo, medido pelas suas respectivas áreas de Floresta mostradas em (a) número de focos de fogo por ano por $10^3$ km <sup>2</sup> , e (b) área queimada em hectares por ano por $10^3$ km <sup>2</sup> . Foi considerado um período de quatro anos (1996-9) para o Líbano e 39 anos (1961-99) para Marrocos. Variação temporal no (c) número de focos de fogo por ano e (d) área queimada na Espanha, Marrocos e cinco países mediterrâneos da União Europeia (Grécia, Itália, França, Espanha e Portugal). ....	19
<b>Figura 5:</b> Localização da Paisagem Protegida de Corno de Bico e da área de estudo. ....	22
<b>Figura 6:</b> Vegetação da área de estudo - CEIA .....	23
<b>Figura 7:</b> Aplicação do fogo prescrito. ....	24
<b>Figura 8:</b> Delimitação da área de estudo (CEIA) e pontos de amostragem. ....	25
<b>Figura 9:</b> Instrumento utilizado para delimitar as parcelas de amostragem. ....	25
<b>Figura 10:</b> Anel metálico de inserção no solo (a), câmara de respiração do solo acoplado ao analisador de folhas (b), parte central do aparelho conectada com a câmara de respiração do solo (c) e como foi-se medido a respiração com visão da sonda utilizada para obter o ar ambiente (d). ....	27
<b>Figura 11:</b> Crivo utilizado neste experimento (a), solo antes (b) e após (c) passagem pelo crivo. ....	28
<b>Figura 12:</b> Permeâmetro de circuito fechado e carga constante. ....	29
<b>Figura 13:</b> Exemplo da avaliação visual da cobertura de vegetação – parcela analisada (a) e classificação da cobertura vegetal (b). ....	32
<b>Figura 14:</b> Cadinhos com amostra após incineração, resfriando no dessecador. ....	33
<b>Figura 15:</b> Região da área de estudo para coleta de monólitos destinados a simulação do fogo em laboratório. ....	35
<b>Figura 16:</b> Identificação da parcela sem fogo destinada a recolha das amostras de solo. ....	36
<b>Figura 17:</b> Coleta dos blocos de solo (a) e os blocos de solo após coleta (b). ....	37

<b>Figura 18:</b> Forno utilizado na simulação do fogo.....	38
<b>Figura 19:</b> Comportamento da temperatura dentro do forno durante a simulação do fogo frio e do fogo quente.....	38
<b>Figura 20:</b> Bloco de solo com as perfurações para introdução dos termopares (a) blocos de solo instalados no forno envoltos pela manta de fibra de vidro, com os três termopares de controles já instalados, dois atrás sob uma placa de metal e um à frente com cabo branco (b).....	39
<b>Figura 21:</b> Medição da respiração do solo nos blocos de amostras, após simulação do fogo. ....	39
<b>Figura 22:</b> Área de amostragem com pontos de medição da respiração do solo em uma parcela que houve aplicação do fogo prescrito e foi tratada após o distúrbio, outra parcela que houve aplicação de fogo prescrito, mas não foi tratada após distúrbio e uma parcela não queimada para valores de referência. ....	41
<b>Figura 23:</b> Anéis utilizados para acoplar a cápsula de medição de respiração do solo na parcela tratada (a), não tratada (b) e sem fogo (c). ....	42
<b>Figura 24:</b> Percentagem de elementos grosseiros nas três camadas de solos analisadas nos dois momentos distintos (antes e depois do fogo prescrito). ....	44
<b>Figura 25:</b> Percentagem de humidade nas três camadas de solos analisadas nos dois momentos distintos (antes e depois do fogo prescrito).....	45
<b>Figura 26:</b> Valores obtidos de $K_i$ e $K_f$ para antes e depois do fogo. ....	46
<b>Figura 27:</b> Valores obtidos de capacidade máxima de água e capacidade de campo para antes e depois do fogo. ....	47
<b>Figura 28:</b> Valores obtidos de porosidade, microporosidade e macroporosidade para antes e depois do fogo.....	47
<b>Figura 29:</b> Quantidade de biomassa seca para cada espécie encontrada nas parcelas estudadas. ....	48
<b>Figura 30:</b> Média do teor de humidade por espécie vegetal. ....	48
<b>Figura 31:</b> Percentagem da cobertura vegetal por parcela analisada. ....	49
<b>Figura 32:</b> Valores obtidos de pH utilizando $H_2O$ (a) e $KCl$ (b) como solução base, para os momentos antes e depois da aplicação do fogo prescrito. ....	50
<b>Figura 33:</b> Valores de condutividade obtidos para antes e depois do fogo prescrito. ....	50

<b>Figura 34:</b> Valores de percentagem da matéria orgânica encontrados para antes e depois do fogo prescrito.....	51
<b>Figura 35:</b> Valores de respiração do solo para antes e depois do fogo prescrito. ....	52
<b>Figura 36:</b> Média dos valores de respiração do solo entre os monolitos analisados ao longo do período de logo após, 24 horas após, quatro dias após e uma semana após a simulação do fogo frio e quente, com suas respectivas equações de regressão e R <sup>2</sup> . ....	53
<b>Figura 37:</b> Comparação da situação referencial da respiração do solo em campo sem queima, com a simulação do fogo e a condição dois anos após o fogo prescrito em uma área tratada e não tratada.....	54
<b>Figura 38:</b> Correlação entre a condutividade e matéria orgânica para as profundidades de 0 - 5 e 5 - 10 cm do solo (ns – não significativo). ....	56
<b>Figura 39:</b> Correlação entre a condutividade e o pH em H <sub>2</sub> O nas profundidades de 0 - 5 e 10 - 20 cm do solo (ns – não significativo). ....	56
<b>Figura 40:</b> Correlação entre a condutividade e o pH em KCl nas profundidades de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm do solo (ns – não significativo). ....	57
<b>Figura 41:</b> Correlação entre matéria orgânica (MO) com porosidade total (P) e microporosidade (MicroP).....	58

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Os sete ODS ligados ao solo e suas relações (EEA, 2019).....	4
<b>Quadro 2:</b> Classificação da permeabilidade dos solos (Figueiredo, 2011). .....	30
<b>Quadro 3:</b> Classificação dos solos quanto a percentagem de matéria orgânica (Santos, 1991).....	34
<b>Quadro 4:</b> Classes do pH do solo (Costa, 1991). .....	34
<b>Quadro 5:</b> Análise de variância a um fator para parâmetros analisados apenas da camada superficial do solo (0 – 5 cm) para os dois momentos diferente (antes e depois do fogo).....	43
<b>Quadro 6:</b> Análise de variância a dois fatores com repetição para parâmetros analisados em três camadas do solo (0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm) e os dois momentos diferentes (antes e depois do fogo).....	44
<b>Quadro 7:</b> Coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre as variáveis físicas estudadas na situação antes do fogo (apenas são apresentados os valores significativos de r, $p < 0,05$ ).....	55

## LISTA DE SIGLAS

AGIF – Agência para Gestão Integrada de Fogo Rurais  
ANOVA – Análise de Variância  
BUI – Índice de Combustível Disponível  
CAOP – Carta Administrativa Oficial de Portugal  
CC – Capacidade de Campo  
CE – Condutividade Elétrica  
CEIA – Centro de Educação e Interpretação Ambiental de Paredes de Coura  
CMA – Capacidade Máxima para Água  
DAP – Densidade Aparente  
DC – Índice de Seca  
DMC – Índice de Húmus  
EG – Elementos Grosseiro  
FAO – Food and Agriculture Organization  
FFMC – Índice de Humidade dos Combustíveis Finos  
FWI – Fire Weather Index  
ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas  
IFN – Inventário Florestal Nacional  
IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera  
IRGA – Infrared Gas Analyzer  
ISI – Índice de Propagação Inicial  
Kf – Permeabilidade Final  
Ki – Permeabilidade Inicial  
MacroP – Macroporosidade  
MEA – Millennium Ecosystem Assessment  
MicroP – Microporosidade  
MO – Matéria Orgânica  
MORE – Laboratório Colaborativo Montanhas de Investigação  
MOS – Matéria Orgânica do Solo  
NCER – Net CO<sub>2</sub> Exchange Rate  
ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável  
ONU – Organização das Nações Unidas  
P – Porosidade Total  
SSSA – Soil Science Society of America

## 1 INTRODUÇÃO

O fogo é um evento global que possui características de renovação e destruição de ecossistemas (Certini, 2005) e está presente no planeta Terra antes mesmo dos seres humanos. Foram encontrados, por meio de registros fósseis, evidências do fogo datados há mais de 420 milhões de anos, logo após o aparecimento das plantas terrestres no período Siluriano (Scott & Glasspool, 2006; Kraft et al., 2015).

Com o passar dos anos e o aumento dos impactos das ações humanas no meio ambiente, como a influência no aumento do aquecimento global e as mudanças econômicas e sociais da sociedade (êxodo rural, mudanças no uso e ocupação do solo, supressão de fogos naturais, extrativismo de recursos naturais), a ocorrência do fogo tem se tornado cada vez mais recorrente, preocupante e impactante (Pyne et al., 1996; Champ & Brenkert-Smith, 2016; Tedim et al, 2020).

Atualmente, a preocupação em eliminar os focos de fogo devido ao seu potencial destruidor tem passado por cima do entendimento de que este evento pode atuar como mantenedor da estrutura, biodiversidade, e funcionalidade de diversos ecossistemas (Bowman et al., 2019; Champ & Brenkert-Smith, 2016). Algumas plantas e animais são bastante impactados pelo fogo, já outras são muito tolerantes e com o fogo possuem maior êxito de sobrevivência. Steuter e McPherson (1995) e Bond e Wilgen (1996) indicam que as plantas, ao longo de suas evoluções, desenvolveram características morfofisiológicas que facilitam a combustão, como mecanismo de eliminar as espécies mais competitivas, porém pouco tolerantes ao fogo.

Portugal, no ano de 2021, de acordo com a Agência para Gestão Integrada de Fogos Rurais (AGIF, 2021), investiu 316 milhões de euros na gestão do risco de incêndio rural, representando um aumento de 9% em relação ao ano anterior. A distribuição deste investimento foi de 46% em prevenção e 54% em supressão de focos de incêndio.

Prevenir os incêndios é mais viável tanto economicamente como ambientalmente, do que recuperar um solo já degradado ou interromper um foco de fogo no momento de seu acontecimento (Rego et al. 2021). Tem-se algumas técnicas de prevenção contra a ocorrência dos grandes incêndios florestais, sendo uma delas a aplicação do fogo prescrito (Lloret et al, 2009; Rego et al. 2021).

O fogo prescrito é uma técnica de aplicação do fogo de baixa intensidade, executado em condições ambientais controladas, por meio da queima da biomassa acumulada (combustível). Esta atividade, além de reduzir a frequência e a intensidade dos grandes incêndios na época da seca,

também atua como forma de controle de ecossistemas, o qual reduz a quantidade de espécies competitivas, ajuda na germinação das sementes de algumas plantas e favorece o crescimento de espécies específicas (Certini, 2005; Rego et al, 2021).

Com a aplicação do fogo prescrito, é possível ter um maior controle sobre os efeitos do fogo no meio ambiente e mitigar possíveis erros, podendo ser considerado uma atividade científica além de apenas uma prática de uso de fogo.

Um dos aspectos da aplicação do fogo prescrito que deve ser levado em consideração é o seu impacto no solo. Este é um recurso não renovável, com diversas funções que asseguram a vida e que dependem da sua qualidade para que essas funções sejam efetivas (FAO, 2015; Bernardi, 2020).

Com isso, apesar de já haver alguns estudos em relação a aplicação do fogo prescrito e esta ser uma técnica comprovada para o combate a incêndios, são necessários mais estudos que avaliem os efeitos do fogo prescrito, tanto negativos como positivos, para curto e longo prazo, pois ainda se tem um conhecimento limitado em relação aos seus impactos, já que é gerado uma perturbação no meio ambiente, mesmo que mínima, em específico no solo.

## **2 OBJETIVO**

Este trabalho possui dois objetivos. O primeiro é avaliar o impacto no solo da aplicação do fogo prescrito para controle de incêndios florestais, em uma área destinada a pastagem, situada na Paisagem Protegida de Corno de Bico - Paredes de Coura, analisando em laboratório as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

O segundo objetivo é o de comparar resultados de simulações do fogo (menos intenso e mais intenso), realizadas em laboratório em solo colhido na mesma área, com resultados de uma aplicação real do fogo prescrito medidos no campo, avaliando o tempo de regeneração de funções do solo após o fogo, em específico a sua taxa de respiração.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A IMPORTÂNCIA DO SOLO

A sustentabilidade, um assunto levado cada vez mais em consideração para a tomada de decisões governamentais e empresariais, é o equilíbrio entre a natureza e o homem, suprimindo as necessidades humanas sem danificar grandemente o equilíbrio ecológico, garantindo as necessidades de gerações futuras (WWF, 2022).

Um recurso que garante a sustentabilidade do planeta Terra é o solo, um ambiente diversificado, com comunidades biológicas complexas, que mantém um bom funcionamento e o equilíbrio do ecossistema (Carrer Filho, 2002; de Magalhães et al, 2015). A pequena camada de solo que cobre a superfície da Terra representa a diferença entre a sobrevivência e extinção da maioria da vida terrestre (Doran & Parkin, 1994). O solo pode ser definido de acordo com a *Soil Science Society of America* (SSSA, 2008) como um “(...) material não consolidado, mineral ou orgânico, existente a superfície da terra e que serve de meio natural para o crescimento das plantas”.

O solo é um recurso vital e possui funções básicas que asseguram a vida. De acordo com o *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2003) o ecossistema possui quatro funções de acordo com os serviços que presta para os seres humanos (serviços ecossistêmicos): provisão (produção de biomassa e fornecimento de matérias primas e recursos energéticos), regulação (atua em diversos processos de controle, como temperatura, ciclo do carbono, azoto e água), suporte (funciona como um habitat para diversos organismos, local de reserva de biodiversidade e é essencial para a ciclagem de nutrientes) e cultural (fornece paisagens e parques de grande valor cultural, científico e educacional) (MEA, 2003; Alexandre, 2015; Bernardi, 2020.).

Dentro dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), sete deles possuem uma relação direta com o solo e não podem ser atingidos sem seu uso sustentável (Quadro 1).

**Quadro 1:** Os sete ODS ligados ao solo e suas relações (EEA, 2019).

<b>ODS</b>	<b>Relação dos ODS com o solo</b>
2 – Fome zero e agricultura sustentável	Melhorando a qualidade do solo pode-se erradicar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável.
3 – Boa saúde e bem-estar	Evitando a poluição do solo por substâncias químicas e perigosas pode-se assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar à toda sociedade.
6 – Água potável e saneamento	Pode-se garantir água potável a todos preservando o solo, devido ao papel que este desempenha no abastecimento e filtragem da água.
11 – Cidades e comunidades sustentáveis	Tornar as cidades sustentáveis, inclusivas, resilientes e seguras é possível se garantir a proteção dos solos, pois estes fornecem patrimônios culturais e naturais.
12 – Consumo e produção sustentável	Não permitindo a entrada de produtos químicos e resíduos no solo e gerindo de forma sustentável os recursos do solo é possível a assegurar um consumo e produção sustentável.
13 – Ação contra a mudança global do clima	O solo pode reduzir os efeitos das alterações climáticas se houver a recuperação de solos degradados e a gestão adequada de seus recursos e também atua no sequestro de dióxido de carbono.
15 – Vida terrestre	Combater a desertificação, gerir as florestas de forma sustentável, impedir e reverter a degradação dos solos pode garantir a vida terrestre e sua diversidade.

Em adição, o solo é um recurso natural não renovável, ou seja, o que é perdido por processos de erosão, salinização ou desertificação não é recuperado, pois o processo de formação do solo é lento, o que influencia nos 40% de espécies de organismos vivos terrestres que são relacionadas diretamente com o solo em algum momento de seus ciclos de vida (Decaëns et al., 2006; Bernardi, 2020).

As funções realizadas pelo solo dependem de sua qualidade, que garante ou não, que o solo execute seus serviços ecossistêmicos (FAO, 2015). De acordo com Doran & Parkin (1994) a qualidade do solo é definida como a capacidade do solo de funcionar dentro das fronteiras de um ecossistema e que sustente a produtividade biológica, mantenha a qualidade ambiental e promova a saúde animal e vegetal.

A qualidade do solo pode variar grandemente em pequenas distâncias e em um curto intervalo de tempo, dependendo de seu uso, o que dificulta sua monitorização (Brammer & Nachtergaele, 2015; FAO, 2015).

O solo é um recurso multifuncional e fundamental para a vida na terra, mas as pressões humanas nos recursos do solo estão atingindo níveis críticos e com isso, a gestão do solo é algo essencial para se desenvolver uma agricultura sustentável e assegurar a regulação climática, protegendo os serviços ecossistêmicos que é realizado em cada região do planeta, de acordo com o seu uso (Alexandre, 2015; FAO, 2015).

## 3.2 PROPRIEDADES DO SOLO

O solo é composto por três fases. A primeira é a sólida, integrada pelo material rochoso e orgânico, originado da decomposição animal e vegetal. A segunda fase, líquida, é a água ou elementos orgânicos e inorgânicos e soluções. Já a terceira é a fase gasosa, composta pelos gases produzidos e consumidos pelas raízes das plantas e animais (CETESB, 2022).

Os solos possuem características que os diferenciam e são denominadas de propriedades do solo, e podem ser físicas, químicas e biológicas que fazem com o que o solo desempenhe suas devidas funções. As propriedades são determinadas pelo processo geológico de sua formação, origem dos minerais, as influências do clima e relevo local e os organismos vivos da região (CETESB, 2022). Tem-se dificuldade de separar claramente as funções físicas, químicas e biológicas devido a dinâmica e interação natural desses processos (Schoenholtz et al, 2000).

Para cada uma dessas propriedades tem-se indicadores que permitem avaliar a qualidade do solo, os quais são suplentes mensuráveis de atributos do solo que indicam quão bem é o funcionamento de determinado solo (Doran & Parkin, 1994; Burger & Kelting, 1999). Muitas das propriedades físicas, químicas e biológicas se desenvolvem de acordo com a parcela de matéria orgânica (MO) presente no solo, sendo esta outra propriedade do que pode ser estudada separadamente (Doran & Parkin, 1994).

### 3.2.1 Propriedades físicas do solo

As propriedades físicas tratam principalmente do arranjo da parcela sólida do solo, que possui diferentes composições, dimensões, formas e diversas configurações possíveis, além dos possíveis poros existentes (Reinert & Reichert, 2006).

Para se avaliar as propriedades físicas do solo, tem-se os seguintes indicadores: a textura, densidade aparente, porosidade, estabilidade de agregados e profundidade, compactação do solo e capacidade de retenção de água (Doran & Parkin, 1994; Nortcliff, 2002). Dentre estes indicadores, a textura (definida pela distribuição dos tamanhos de partículas) e a estrutura do solo (definida pelo arranjo das partículas em agregados), são ditas como as propriedades físicas mais importantes (Reinert & Reichert, 2006).

### 3.2.2 Propriedades químicas do solo

Os indicadores escolhidos para análise das propriedades químicas podem variar de acordo com o que se deseja estudar. Estes incluem o pH, condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica, salinidade, composição de nutrientes em plantas e no solo (azoto, carbono, fósforo, potássio e enxofre) e concentração de elementos tóxicos (como metais pesados) (Nortcliff, 2002).

As propriedades químicas são geralmente associadas a ligações químicas do carbono orgânico do solo com partículas minerais, reduzindo a habilidade de degradação das enzimas e decompositores. Com isso, muitas propriedades químicas podem influenciar diretamente em processos microbiológicos, como a concentrações de nutrientes disponíveis no solo (Schoenholtz et al, 2000; Six et al., 2002).

### 3.2.3 Propriedades biológicas do solo

A importância das propriedades biológicas do solo costuma ser desprezada, pois boa parte dos indicadores não são visíveis a olho nu, porém boa parte dos ciclos globais essenciais (água, carbono (C), azoto (N), fósforo (P) e enxofre (S)) só ocorrem devido a interação da fauna e microbiota com as propriedades físicas e químicas do solo (Doran & Parkin, 1994). Além disso, é dito que 80 a 90% dos processos que ocorrem no solo são devidos aos seres vivos presentes no solo (Weldmichael et al, 2020).

Os indicadores biológicos são muito dinâmicos e sensíveis às variações das condições do solo e frequentemente são utilizados para avaliações a curto prazo (Nortcliff, 2002). As propriedades biológicas podem ser avaliadas pelos seguintes indicadores: população de micro-, meso- e macrorganismos, biomassa microbiana, mineralização de nutrientes, taxa de fixação biológica de N<sub>2</sub> e respiração do solo, assim como pela atividade enzimática do solo (Doran & Parkin, 1994; Nortcliff, 2002). Sendo a taxa de respiração do solo gerada por raízes, organismos na rizosfera, decomposição da matéria orgânica por microrganismos e sua respiração (Wei et al, 2010).

### 3.2.4 Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser definida como todo material orgânico do solo provenientes da deterioração da vegetação e de tecidos animais, os produtos de suas decomposições

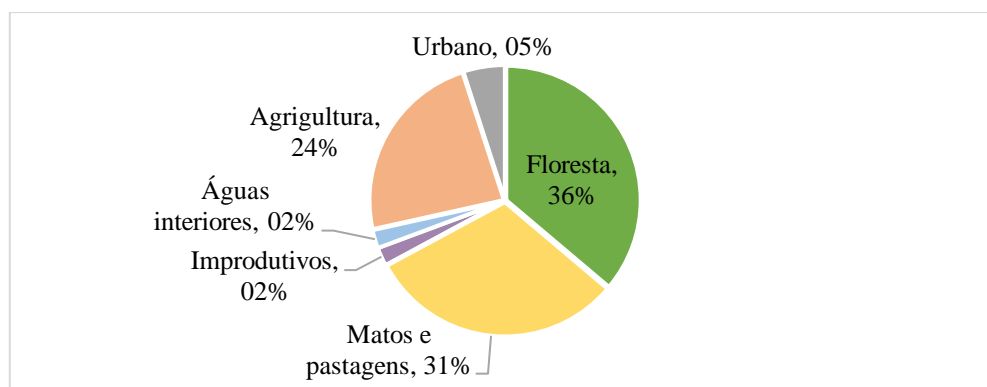
e a biomassa do solo (Stevenson, 1994). A concentração da MOS depende da quantidade de entrada de material orgânico, da taxa de mineralização deste material, da textura do solo, do clima entre outros (Costa et al, 2013).

A matéria orgânica do solo influencia grandemente todas as outras propriedades (físicas, químicas e biológicas como pH, densidade do solo, capacidade de troca catiônica e diversidade biológica) e é um indicador chave para determinar a qualidade do solo, pois sua interação com outros componentes do solo influencia diretamente diversas funções do solo, como o sequestro de carbono, mineralização de nitrogênio, agregação de partículas, desenvolvimento da vegetação e retenção de água (Nortcliff, 2002; Cunha et al, 2015; Hoffland et al., 2020).

A matéria orgânica também é uma fonte de energia e nutrientes, para e proveniente dos microrganismos, sendo que a vegetação representa o principal material constituinte da MOS que passa a ser dominado por material de origem microbiológica, que então, contribui na estabilização do solo (Costa et al., 2004; Kallenbach et al, 2016; Hoffland et al., 2020). De acordo com a *European Communities* (2011), a perda de matéria orgânica é reconhecida como uma das principais ameaças ao solo. Este é um componente essencial ao solo e influencia diretamente a sua fertilidade e interage continuamente com diversos processos que ocorrem no meio (Cunha et al, 2015).

### 3.3 USO DO SOLO EM PORTUGAL CONTINENTAL

Portugal continental, de acordo com o sexto Inventário Florestal Nacional (IFN6) realizado em 2015 pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), tem seu uso do solo de acordo com a Figura 1.



**Figura 1:** Percentagem representativa do uso do solo em Portugal Continental.

**Fonte:** ICNF, 2015.

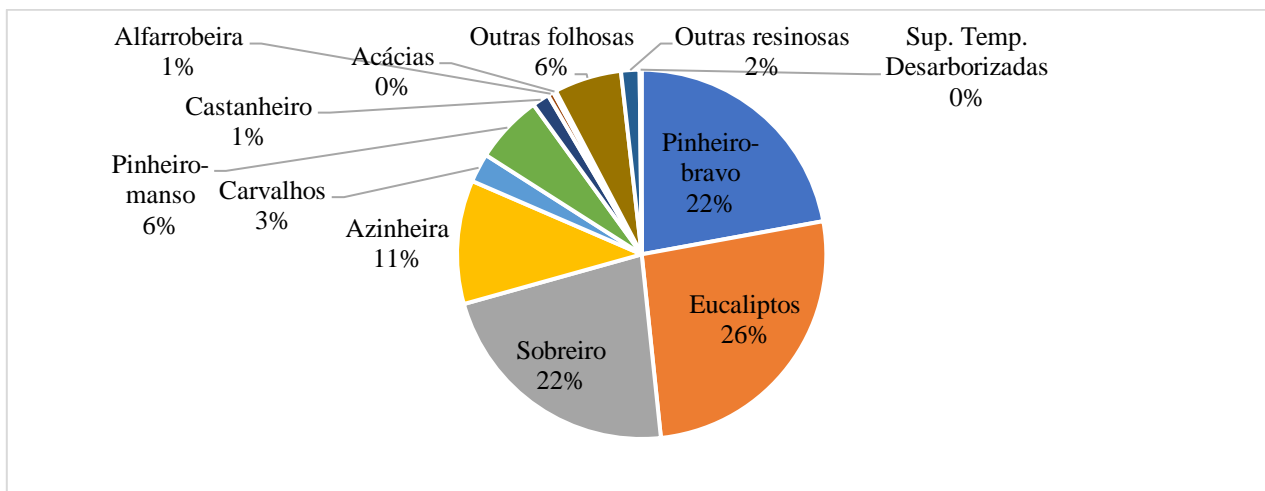
Observa-se que a área de florestas, terrenos arborizados e temporariamente desarborizados (superfícies cortadas, ardidas e em regeneração), é a principal categoria de uso do solo em Portugal continental (36%), com uma área total de 3224,2 mil ha.

Em relação ao ano de 2005 e o mais atual (2015), o ICNF mostra que houve um aumento de 8,3, 49,5, 14,7 e 43,4 mil ha para o uso de solo de floresta, mato e pastagem, águas interiores e urbano, respetivamente, e uma diminuição de 4,1 e 111,8 mil ha para solos improdutivos e agricultura, respetivamente. Então, comparando os anos em questão, a categoria que houve maior aumento em relação a sua área foi a urbana, de 10,88% e a que teve maior diminuição foi a área de agricultura, 8,19%.

### 3.3.1 Composição florestal de Portugal continental

O IFN6 mostra que as florestas de Portugal possuem 92,6% de sua superfície arborizada e 7,4% da sua superfície, temporariamente desarborizada, sendo deste último: 3,1% cortada, 0,4% ardida e 3,9% em regeneração. Em sua maioria (33,7%), as florestas são compostas por formações de folhosas perenifólias, seguidas de pinhais e outras resinosas (29,7%), eucaliptais (26,2%), folhosas caducifólias (9,9%), acaciais (0,3%) e as superfícies temporariamente desarborizadas (0,2%) (ICNF, 2015).

Devido ao clima, relevo, características do solo e a influência histórica, a composição das espécies vegetais presentes nas florestas de Portugal continental são muito distintas, como exemplificadas na Figura 2 (ICNF, 2015).



**Figura 2:** Distribuição das principais espécies presentes nas florestas de Portugal continental.  
**Fonte:** ICNF, 2015.

Portugal é dividido em cinco regiões, sendo elas: Norte, Centro, Lisboa, Alentejo e Algarve, todas com composições florestais diferentes entre si. A região Norte possui uma área florestal de 584,9 mil ha e as principais espécies de vegetação da região são o pinheiro-bravo e eucalipto que compõem 30,8 e 28,1% respetivamente, das florestas do Norte de Portugal continental, além disso o carvalho e a castanheira possuíram crescimentos consideráveis (23,8 e 29,8% respetivamente) se compararem os anos de 2005 e 2015 para essa região (ICNF, 2015).

O centro de Portugal, com uma área florestal de 1093,1 mil ha, é a região com maior armazenamento de carbono em floresta do país, com o total de 128 mil toneladas de dióxido de carbono, representando 38% do estoque florestal total de Portugal. Possui como principais espécies da floresta o pinheiro-bravo e eucalipto, que ocupam respetivamente 42,1 e 40,2% do território das florestas centrais de Portugal (ICNF, 2015).

Já a região de Lisboa, possui uma área florestal de 66,3 mil ha, maior do que a área urbana da região (62,2 mil ha). As principais espécies da vegetação da região são o sobreiro (18%) e o pinheiro-manso (13,7%), sendo que a última ocupava a quarta posição no ano de 2005 e obteve um aumento de 16,1%, subindo à segunda posição no ano de 2015 (ICNF, 2015). O Alentejo, região com 1334,6 mil ha de floresta, possui a maior área para este uso do solo em Portugal e tem como principais espécies o sobreiro (45,7%) e a azinheira (23,8%). A última região, Algarve, possui uma área florestal de 145,3 mil ha, o que representa 29,1% do terreno total e tem como principais espécies o pinheiro manso (27,8%) e o sobreiro (24,1%) (ICNF, 2015).

### 3.4 DEGRADAÇÃO DO SOLO

A degradação do solo se refere à diminuição da sua qualidade, capacidade de produzir bens econômicos e fornecer serviços ecossistêmicos que são essenciais à vida humana, como a ciclagem de nutrientes, retenção de água e o suporte de habitats (Zehnder, 1995; FAO, 2015; Lal, 2010) e este processo pode incluir a redução da atividade biológica (Piazza et al., 2020) e a disponibilidade de nutrientes no solo (de Souza Oliveira Filho et al., 2019).

De acordo com a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2022), tem-se diversos estudos que estimam o custo anual da degradação do solo podendo chegar a U\$1 trilhão, levando em consideração a redução dos serviços ecossistêmicos prestados e a má gestão do solo. Além disso, estima-se que 30% dos solos do mundo estão degradados e 85% das causas das degradações são as erosões geradas pelo vento e água (Mbagwu, 2003; FAO, 2015).

Tem-se quatro categorias principais dos processos de degradação do solo, de acordo com os processos responsáveis pelas alterações das propriedades, sendo elas o processo físico e mecânico, químico e físico-químico, biológico e bioquímico e o hidrológico, os quais podem estar correlacionados e ocorrer ao mesmo tempo (Zaidel'man, 2000; Molchanov et al., 2015).

A degradação física e mecânica são as perturbações na textura, densidade aparente e o estado dos agregados do solo e a remoção e degradação mecânica do material do solo por vento ou escoamento superficial. As degradações do solo químicas e físico-químicas incluem mudanças desfavoráveis no complexo de absorção, nas propriedades de troca ácido-base e no potencial de redução do solo. Os processos de degradações biológicas e bioquímicos do solo são relacionados as mudanças negativas nos microrganismos do solo e a contaminação por microrganismos patogênicos. Já a degradação hidrológica está relacionada às alterações desfavoráveis nos processos de infiltração do solo, causados por engenharias hidráulicas inadequadas, construções de rodovias e outros processos que levem ao excesso de umidade do solo e inundações (Molchanov et al., 2015).

Diversas ações, provenientes de causas naturais e principalmente de atividades humanas (como o uso do solo, seu manejo e as mudanças realizadas no mesmo), podem levar à degradação do solo (FAO, 2020). Porém não é tão simples diferenciar as influências naturais das diretas ou indiretas do ser humano sobre o solo (FAO, 2015).

Apesar de o foco das causas da degradação do solo serem as antropogênicas, em outras circunstâncias, principalmente em solos de ecossistemas áridos e semiáridos, a degradação por

ações naturais é mais recorrente do que a causada pelas ações humanas (Vasu et al., 2018). Como exemplificado por Evans e Geerken (2004) e Wessels et al. (2007), que por meio do índice de vegetação com diferença normalizada e dados de precipitação, encontraram como principal causa de perda de cobertura vegetal e a rede de produção primária a diminuição de chuvas. Outro estudo, realizado no norte do Irão, mostrou que o solo da região foi degradado devido ao acúmulo de carbonetos na superfície do solo (Khormali & Ajami, 2011).

Já as ações humanas que causam algum impacto no solo incluem o desmatamento, urbanização, intensificação da agricultura, retirada de matéria orgânica, compactação, impermeabilização e acidificação do solo, desequilíbrio de nutrientes, erosão, desabamentos de terras e incidência de fogo, sendo que o nível do impacto dessas ações nas funções do solo varia de acordo com a região do mundo (FAO, 2015; 2020).

### 3.5 INCÊNDIOS FLORESTAIS

O fogo é um evento natural de longa ocorrência histórica, existente muito antes da presença humana, como aqueles iniciados por raios e possui grande influência na evolução de diversos seres vivos (DeBano et al, 1998; Vamstad & Rotenbeery, 2010; Pereira et al, 2016). Sendo assim, um importante fator ambiental que interfere na dinâmica e composição das comunidades biológicas (Marques, 2020).

No entanto, a partir do período Pleistoceno Médio, os seres humanos aprenderam a manipular o fogo e passaram a ser altamente adeptos ao seu uso para transformar os ecossistemas de acordo com os seus interesses, o que nas últimas décadas, devido as transformações econômicas, sociais e ambientais do mundo (êxodo rural, supressão de fogos naturais, desmatamento e mudanças climáticas), levou a um aumento alarmante na frequência e intensidade das queimas, resultando em maiores consequências no meio ambiente (Pyne et al., 1996; DeBano et al, 1998). Isso gerou uma base de experiências e conhecimentos sobre o efeito do fogo em ecossistemas naturais e levantou maiores preocupações em relação a sua incidência (DeBano et al, 1998).

Os efeitos do fogo dependem da sua severidade, que é determinada pela duração e intensidade do fogo, sendo o último parâmetro a taxa em que o fogo produz energia térmica e é controlado por diversos fatores ambientais que afetam o processo de combustão, como a quantidade, natureza e humidade do combustível, a temperatura, humidade e velocidade do vento e a topografia da região (Batmanian, 1983; Certini, 2005).

Os incêndios florestais, definidos como qualquer foco de fogo não controlado iniciados em arbustos ou florestas, por ações humanas ou não (CBMGO, 2017; Tedim & Leone, 2020), podem resultar em perdas materiais, destruições totais de ecossistemas, mortes de seres vivos e mudanças drásticas nas funções estruturais do meio ambiente (Penman et al., 2013; FAO, 2020). Em fogos extremos tem-se, de acordo com o NWCG (2020) pelo menos uma das características a seguir: alta taxa de propagação do fogo, risco de propagação por partículas incandescentes (*spotting fire*) e fogo de copas (*crown fire*), redemoinhos de fogo e fortes colunas de convecção.

Como exemplo dos impactos, frequências e aumento dos incêndios florestais nos últimos anos tem-se a cidade de Yaktusk, localizada na Rússia e conhecida com a cidade mais fria do mundo, que no ano de 2021 teve seu ambiente bruscamente alterado, sendo envolta por fumaça, devido aos incêndios florestais ocorridos no seu entorno, e nesta mesma época, no dia 19 de julho, o país registrou mais de 400 incêndios em um dia (Kottasová, 2021). Tem-se também, no ano de 2020 o bioma do Pantanal - Brasil, onde quase 30% da sua área (40.606 km<sup>2</sup>) foi queimada, afetando 4,65 bilhões de animais e causando a morte de 10 milhões do mesmo, assim como 500 famílias ribeirinhas e indígenas que também foram impactadas (Berlinck et al., 2021).

Em agosto de 2022, a floresta Amazônica teve seu pior dia de queimadas em 15 anos, com 3.358 focos de incêndios (INPE, 2022). Outros grandes incêndios florestais recentes ocorreram na Austrália (2019), EUA (2020) e em alguns países mediterrâneos, como a Itália (2021), que registrou em um único final de semana mais de 800 focos de incêndios, e a Grécia (2021), onde 8 pessoas ficaram feridas após o fogo atingir 20 casas residenciais (Filkov et al., 2020; Higuera & Abatzoglou, 2021; GLOBO, 2021).

### 3.5.1 Incêndios florestais em Portugal

Portugal está entre uma das posições mais elevadas no ranking de maior incidência de incêndios na Europa (Beighley & Hyde, 2018). Um dos maiores incêndios ocorridos em Portugal ocorreu junto a localidade de Escalos Fundeiros, do município de Pedrógão Grande, em Leiria, no mês junho de 2017, que deixou 66 mortos, 253 feridos, cerca de 500 casas queimadas e ardeu uma área de 53 mil ha (ICNF, 2017).

No ano de 2022, o 5º relatório provisório do ICNF (2022), que inclui o período de 1 de janeiro a 31 de agosto, registrou 9701 incêndios rurais com um total de 106639 hectares ardidos,

que se comparado com a média histórica dos 10 anos anteriores para o mesmo período nota-se uma diminuição 15% de incêndios rurais, mas um aumento de 36% em área ardida.

O país possui um clima mediterrâneo, com períodos intercalados de temperaturas amenas e com precipitações (invernos), que propiciam o crescimento da vegetação e períodos quentes e secos (verão), que favorecem a ocorrência de incêndios, além de que os ventos locais nessa época do ano aumentam a dessecação da matéria orgânica (combustível) e a propagação do fogo (Pausas, 2004; Lloret et al. 2009; Shakesby, 2011).

A vegetação nativa mediterrânea também é um fator que contribui grandemente para a alta incidência das queimas no país, pois esta é um ótimo combustível ao fogo. Tem-se 3 características fundamentais desta vegetação que promovem os incêndios de alta intensidade e de rápido alastro (Lloret et al., 2009; Shakesby, 2011).

A primeira característica é o grande acúmulo de vegetação em galhos e folhas mortas que possuem a decomposição lenta. A segunda é a relação da alta área superficial do material vegetal sobre o seu próprio volume (um sistema de defesa dessas plantas para evitar a perda de água por evaporação durante os períodos de escassez de água), permitindo com que após a perda de água da matéria seja necessário menos calor para esta entrar em combustão e facilitando as reações químicas devido a maior quantidade de oxigênio por unidade de área estar em contato com o combustível. Já a terceira é a composição química das plantas no mediterrâneo, que possuem componentes voláteis em abundância, altamente inflamáveis e com baixos pontos de ebulição (Lloret et al., 2009).

Em Portugal continental as áreas de matos, que estão presentes em boa parte do país e principalmente na região Nordeste, apresentam as características de vegetação propícia a incêndios, influenciando na alta taxa de queimas (Marques et al., 2011).

De acordo com o ICNF (2022) a média anual para os anos de 2012 a 2021 de números de focos de incêndios e área queimada em Portugal é de 11409 e 78388 ha, respetivamente. Em relação aos focos de incêndios, 9561 foram investigados e encontrou-se uma causa específica para 6267 destes, sendo as principais: incendiarismo (27%), queimadas extensivas de sobrantes florestais ou agrícolas (18%) e reacendimento de incêndios (14%).

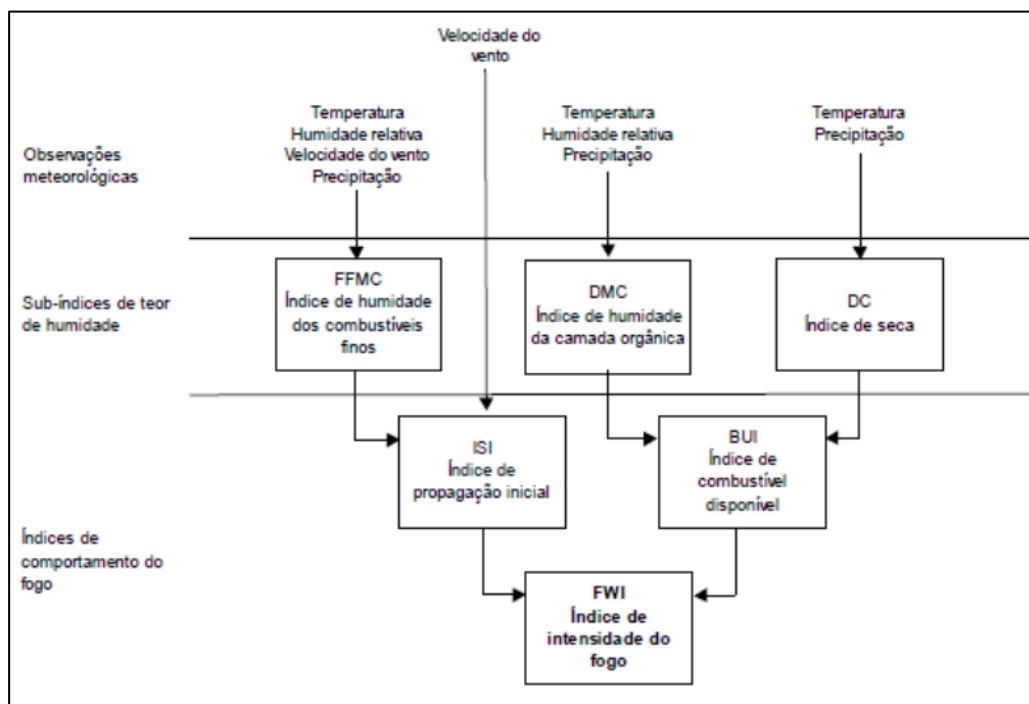
Em adição, para o ano de 2021, a região ao norte do Tejo foi a que registrou a maioria dos conselhos que apresentam o maior número de incêndios e caracterizam-se por possuir altas

densidades populacionais ou por utilizarem o fogo como ferramenta de gestão agroflorestal (ICNF, 2021).

Para avaliar a intensidade do fogo o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) utiliza o índice de meteorológico de risco de fogo – *Fire Weather Index* (FWI), que é o índice meteorológico de incêndio do sistema canadense, que tem sido um mecanismo de grande relevância para prever os riscos de incêndios rurais (Carvalho, 2014).

O FWI possui seis indicadores, sendo três sobre o teor de humidade do combustível e três sobre o comportamento do fogo (Figura 3). Há neste índice as seguintes subdivisões: índices de humidade dos combustíveis finos (FFMC), índice de húmus (DMC), índice de seca (DC), índice de propagação inicial (ISI) e o índice de combustível disponível (BUI).

O FFMC corresponde ao teor de humidade dos combustíveis finos mortos, na camada de até 2 cm de profundidade do solo, refletindo as condições meteorológicas dos últimos 3 dias. O DC é o teor de humidade dos combustíveis médios mortos, na camada de 5 – 10 cm do solo. O terceiro subíndice, ISI, representa a velocidade de propagação do fogo. Já o BUI representa a carga de combustível disponível para combustão (IPMA, 2023 a).



**Figura 3:** Estrutura do índice meteorológico de risco de fogo - FWI.

Fonte: IPMA, 2023.

### 3.6 IMPACTOS DO FOGO NO SOLO

Assim como outros aspectos, o solo também é afetado de acordo com a severidade e frequência do fogo (Rodrigues, 1999; Certini, 2005; FAO 2020). As queimas afetam a composição de espécies terrestres tanto acima, como a abaixo da superfície do solo, o que afeta diretamente as funções e os serviços ecossistêmicos prestados pelo solo (FAO, 2020; Penman et al., 2013). Estudos mostram que em um curto período após a queima, a biota do solo é bruscamente reduzida, mas em alguns anos a sua biomassa e seu funcionamento são recuperados, dependendo da severidade do fogo (FAO; 2020).

Apesar de em solos húmidos, o calor ser normalmente transportado mais rápido e para uma maior profundidade, o calor latente da água previne que a temperatura passe dos 95°C até que a água seja totalmente evaporada (Campbell et al., 1994). De acordo com Certini (2005), a duração do fogo é o fator que maior afeta as propriedades abaixo da superfície do solo.

Muitas propriedades físicas, químicas e biológicas são modificadas pela passagem do fogo em florestas, o que promove tanto a interrupção dela, como também a sua renovação. Sendo o fogo um importante filtro ambiental que restaura os nutrientes do solo, altera a dinâmica das comunidades biológicas, a quantidade de biomassa disponível, a distribuição da vegetação e a flamabilidade da vegetação (Certini, 2005; Bowman et al., 2009).

Essas alterações na vegetação são exemplificadas em estudos feito por Scariot et al. (2005), que mostram cortiças espessas em árvores, que funcionam como uma proteção térmica a altas temperaturas e a maior biomassa em raízes que permitem a rebrota após a passagem do fogo.

#### 3.6.1 Impactos do fogo nas propriedades físicas do solo

Em relação as propriedades físicas do solo que sofrem maior alteração após a queima, tem-se a diminuição do volume dos macroporos, do tamanho dos agregados e da taxa de infiltração do solo, levando a um aumento da densidade e da resistência à penetração de raízes (Utset & Cid, 2001; Redin et al., 2011). Um estudo realizado em Latossolo de clima temperado, por Mallik et al. (1984) constatou um entupimento dos poros superficiais causados pelas cinzas, o que não ocorreu em um outro estudo realizado no mesmo tipo de solo, em clima tropical, por Hernani et al. (1987).

Os fogos florestais alteram a humidade do solo, devido a mudança na taxa de infiltração e transpiração deste, que afetam o estoque de água do meio (Redin et al., 2011). A *Georgia Forestry Commission* (2010) observou que uma grande quantidade de material disponível para queima junto

a um clima seco, resulta em grandes incêndios, que expõem as superfícies do solo e dos minerais, levando a erosões. Sendo que de acordo com Huffman et al. (2001), os efeitos do fogo relacionados a permeabilidade do solo raramente afetam profundidades depois dos primeiros cinco centímetros.

Em um estudo realizado por Piovesan (2022), em Leptosolos úmbricos, no nordeste de Portugal, as propriedades físicas que mais apresentaram variância em relação ao solo antes, imediatamente após e dois meses após fogo, foram: densidade aparente, capacidade máxima de água, capacidade de campo, microporosidade e armazenamento de água no solo.

### 3.6.2 Impactos do fogo nas propriedades químicas do solo

De maneira geral, a queima da vegetação aumenta a concentração de nutrientes, presentes nas cinzas, como o de fósforo (P), potássio (K) e cálcio (Ca) na superfície do solo, acelerando o processo de mineralização e aumentando a disponibilidade dos nutrientes para o crescimento das plantas para profundidades acima de 0,5cm do solo (Kauffman et al., 1994; Rheinheimer et al., 2003). Contudo, esse efeito tende a desaparecer a médio prazo, devido à lixiviação dos nutrientes pela ação de chuvas, resultando muitas vezes em concentrações menores do que as observadas antes da passagem do fogo (Knicker, 2007).

O azoto (N), tem o seu ciclo grandemente afetado após a passagem do fogo, no qual a concentração de N amoniacal aumenta e então é nitrificado rapidamente, podendo ser lixiviado como os outros nutrientes e volatilizado (Mroz et al., 1980; Rheinheimer et al., 2003).

Em relação a acidez e basicidade do solo, estudos realizados por Ulery (1993), Scharenbroch et al. (2012) e Nogueira et al. (2014) evidenciaram que em um período de até 6 meses após a queima o pH aumenta-se, mas Nogueira et al. (2014) observou que após três anos o pH se assemelha a situação anterior ao fogo. Já a condutividade do solo, um estudo realizado por Hernández et al. (1997) na região de Murcia, mostrou que seus valores tendem a aumentar após a queima, o que não ocorreu na região norte de Portugal, em um estudo realizado por Nogueira et al. (2014), no qual os valores tenderam a abaixar.

### 3.6.3 Impactos do fogo nas propriedades biológicas do solo

O efeito nas propriedades biológicas do solo é mais intenso imediatamente após a passagem do fogo, sendo a redução da biomassa o principal fator observado (Araújo & Ribeiro, 2005; Certini,

2005). Devido as mudanças na composição da microbiota e substratos usados pelos microrganismos, a atividade bioquímica e microbiológica, que depende da atividade metabólica dos microrganismos do solo, também é afetada (Hernández et al.; 1996; Certini, 2005). Outros efeitos na biota do solo podem ocorrer devido a produção de poluentes gerada pelo processo de combustão (Certini, 2005)

As propriedades químicas e biológicas estão conectadas e são afetadas pela passagem do fogo de forma simultânea (Redin et al., 2011). Santos et al. (1992) verificou que a redução da população microbiana, aumento temporário da disponibilidade de nutrientes, mudanças no pH, oxidação da MOS e aumento da fonte de carbono ocorrem ao mesmo tempo. Ressalta-se que ocorrem alterações momentâneas nos parâmetros biológicos do solo, que em pouco tempo se recompõem ao estado de referência (anterior ao fogo) (Barreta et al., 2005).

Em outro estudo, elaborado por Choromanska e DeLuca (2002), foi possível observar que as mudanças nas propriedades biológicas do solo são influenciadas grandemente pela humidade do solo. Notou-se que três solos, com diferentes níveis de humidade, obtiveram diferentes resultados na diminuição da biomassa microbiológica após a queima. Onde o solo com maior humidade foi o mais afetado, provavelmente pela maior transmissibilidade de calor nesse ambiente do que em locais secos, sendo a água um melhor condutor de calor do que o ar.

### 3.7 CONTROLE DE INCÊNDIOS

Minimizar, prevenir e eliminar a degradação do solo é essencial para manter os serviços fornecidos pelo solo e são mais economicamente viáveis do que reabilitar um solo já totalmente degradado (FAO, 2015). O conceito de prevenção relacionado aos incêndios florestais é definido como:

todas as medidas, normas ou atividades destinadas a evitar incêndios florestais, tais como educação ambiental, fomento de culturas que não dependam do uso do fogo, fomento de técnicas alternativas ao uso do fogo (plantio direto), rondas, a avaliação antecipada dos fatores de risco e outros (prevenção de riscos) e aquelas adotadas para impedir a propagação do fogo em setores cobertos com vegetação, isto é, aceiros (prevenção de perigo). (ICMBIO, 2010, p. 23)

Sendo assim a prevenção contra os grandes incêndios florestais, antes do combate (extinguir os focos de incêndios que ocorram) é por onde se começa a proteção ambiental contra esse

fenômeno e resultam em efeitos positivos tanto a longo, como a curto prazo (ICMBIO, 2010; Rego et al., 2021).

A prevenção total dos incêndios é uma meta praticamente inatingível (CBMDF, 2021). No meio rural, de modo geral, o fogo é utilizado nas pastagens, lavouras, queimas de lixo, entre outros, de maneira não controlada, sem nenhum planejamento, levando a desastres ecológicos e perdas materiais (Ribeiro et al., 2012).

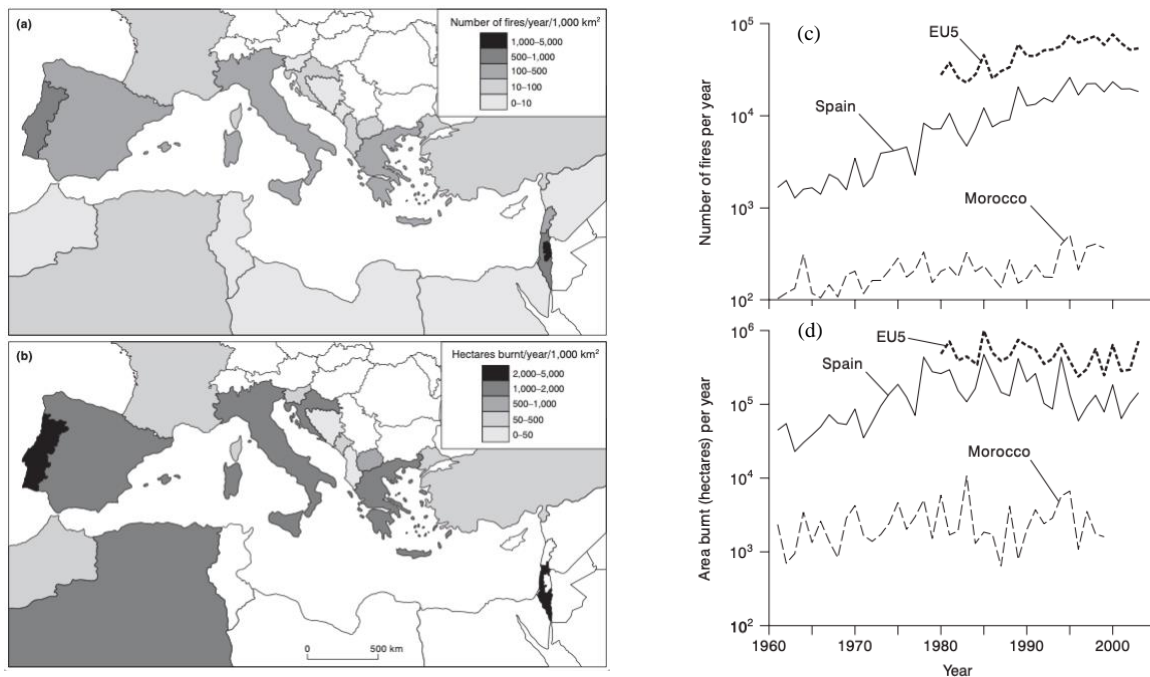
De acordo com o Lloret et al. (2009), tem-se 3 maneiras de prevenir os incêndios florestais: (1) reduzir a ignição do fogo, (2) aumentar a supressão do fogo e (3) diminuir a quantidade de combustível disponível.

A realização da supressão do fogo traz controvérsias, pois isso leva ao “paradoxo do fogo”, onde o acúmulo de combustível pode ser queimado posteriormente em grandes incêndios florestais, causados por fatores climáticos, dos quais não se tem controle e como já observado anteriormente, em alguns biomas o fogo é um fenômeno natural e necessário para a sucessão ecológica (Arno e Brown, 1991; Lloret et al., 2009; Keane, 2015).

Sem a supressão do fogo tem-se maior ocorrência de queimadas de menores escalas, e já com a supressão do fogo há menor ocorrência de queimadas, mas de maiores escalas (Lloret et al., 2009). Porém Keeley e Fotheringham (2001) e Moritz et al. (2004) argumentam que incêndios de grande escala podem acontecer independente da supressão do fogo, e podem ser causados simplesmente por fatores climáticos adversos.

Então, devido a conflitos de ideias entre pesquisas, resta-se a diminuição de combustível disponível para queima como forma de prevenção a queimadas. Keane (2015) propôs os quatro Ds, onde a Deposição, Decomposição, Distúrbio e a Dinâmica da vegetação e suas interações é o que influencia na disponibilidade do combustível e o ser humano possui um papel importante nesse esquema. O controle do nível de combustível pode ser feito por meio de limpeza (coleta de madeira, folhas, galhos etc.), queimas controladas ou pastagem (Lloret et al., 2009).

Os hábitos de limpeza, pastagem e outros usos do solo podem explicar a diferença da área queimada entre a região mediterrânea do sul da Europa e o norte da África, assim como o aumento súbito das queimadas entre os anos 1970 e 1980 na Europa, com o abandono das áreas rurais (Figura 4).



**Figura 4:** Fogos nos países localizados na região do Mediterrâneo, medido pelas suas respectivas áreas de Floresta mostradas em (a) número de focos de fogo por ano por  $10^3 \text{ km}^2$ , e (b) área queimada em hectares por ano por  $10^3 \text{ km}^2$ . Foi considerado um período de quatro anos (1996-9) para o Líbano e 39 anos (1961-99) para Marrocos. Variação temporal no (c) número de focos de fogo por ano e (d) área queimada na Espanha, Marrocos e cinco países mediterrâneos da União Europeia (Grécia, Itália, França, Espanha e Portugal).

**Fonte:** Lloret et al., 2009.

Mesmo que as pessoas voltem a viver no campo, dificilmente irão cultivar a terra como era feito antigamente, continuando com o acúmulo de combustível, que só irá ser alterado caso seja feita uma limpeza ou até que o próximo fogo ocorra. Esse fogo pode ser prescrito, controlado ou os incêndios (Lloret et al., 2009).

### 3.8 FOGO PRESCRITO

O fogo prescrito é uma técnica de aplicação deliberada do fogo, sob condições ambientais definidas, utilizada para prevenir a ocorrência de incêndios florestais, por meio da redução do nível de combustível, principalmente em grandes áreas, minimizando a extensão, frequência e severidade dos incêndios indesejados ou também para facilitar a germinação e crescimento de espécies florestais específicas, eliminar espécies dominantes, atuando também como forma de gestão de ecossistemas (Fernandes, 2002; Certini, 2005; Castro et al. 2010; Rego et al., 2021).

Na literatura, muitas vezes os termos “fogo prescrito” e “fogo controlado” são utilizados como sinônimos, contudo para Pyne et al. (1996), Vega et al. (2001) e Rego et al. (2021), existe uma diferença entre eles.

A queima controlada é uma condição necessária, mas não suficiente para um fogo prescrito (Vega et al. 2001). Pyne et al. (1996) diz que para se considerar um fogo prescrito é necessário ter-se: uma definição do ambiente de queima desejado e de um plano de queima (descrição dos procedimentos que serão executados), objetivos específicos a se atingir com o fogo e características a se observar (comportamento do fogo que reflete nos seus efeitos), definições de operações prévias à aplicação do fogo e o padrão de ignição (que definem sua dimensão, intensidade e características temporais que formam um conjunto de métodos de controle do fogo) e uma avaliação do fogo, sendo assim uma experiência científica, na qual os resultados permitem melhorar a prática do fogo prescrito.

O fogo prescrito é aplicado normalmente em solos moderadamente húmidos (durante o inverno na região mediterrânea), com o objetivo de apenas diminuir a biomassa acumulada, sendo então de baixa intensidade e severidade, onde tipicamente somente os componentes mais finos e aerados do combustível são queimados (Walstad et al, 1990; Rego et al. 2021). Um fogo em rápido movimento, como o fogo prescrito, pode liberar uma enorme quantidade de calor, mas transferir baixa energia, afetando apenas a camada superficial do solo (Meira Castro et al, 2010).

Para Fernandes et al. (2002) ao recorrer ao fogo prescrito é possível controlar os impactos ambientais, podendo esses serem nulos ou inexistentes e Mataix-Solera et al. (2011) afirma que o efeito no solo pode ser considerado temporário.

Contudo, ainda há um conhecimento limitado sobre aplicação do fogo prescrito e as incertezas associadas aos seus efeitos, tanto negativos como positivos, ainda são um desafio para a ciência e podem se tornar ainda mais problemáticos as mudanças climáticas previstas para o futuro (Bowman et al., 2009; Durigan e Ratter, 2016). Isso evidencia a necessidade de estudos que avaliem os efeitos da aplicação do fogo prescrito quando usados para reduzir a frequência dos grandes incêndios florestais indesejados.

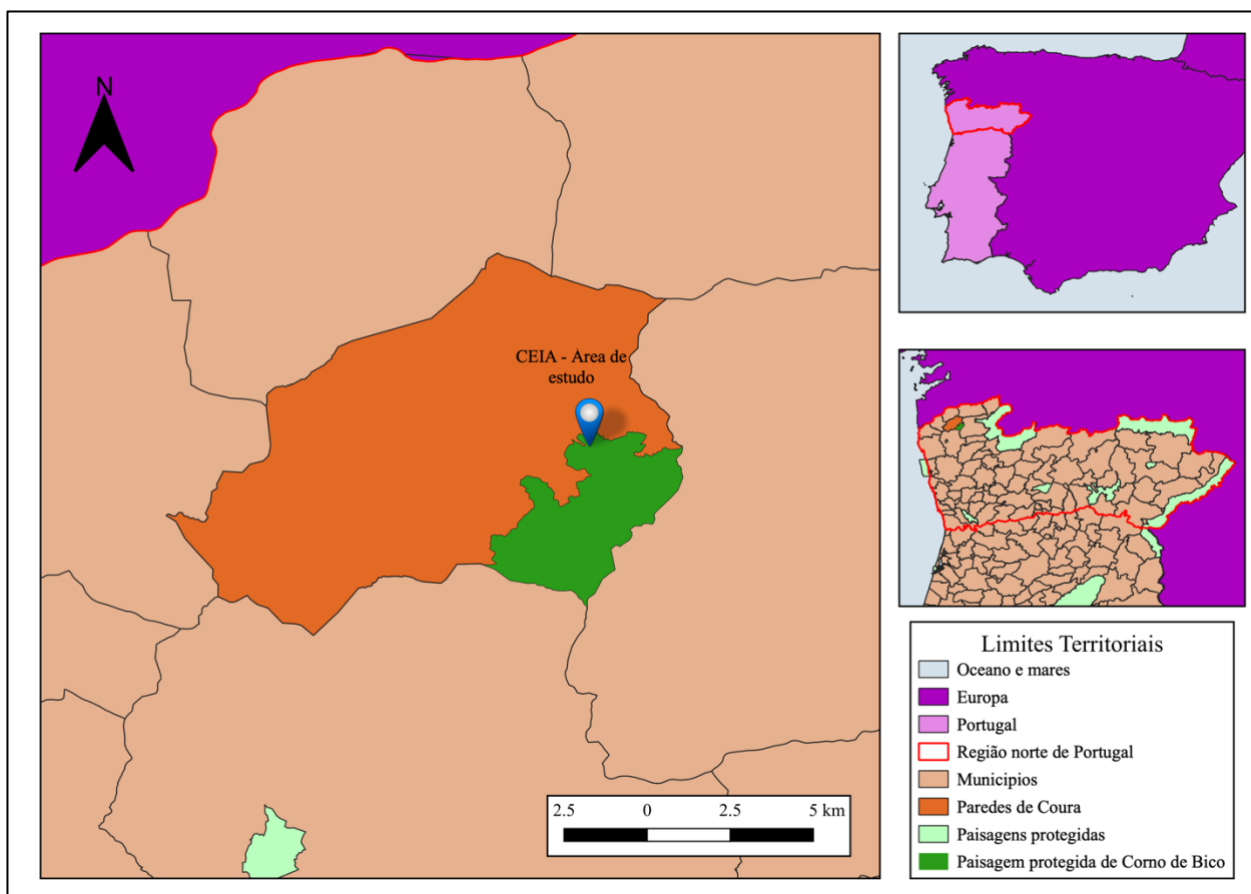
## **4 METODOLOGIA**

Este trabalho foi desenvolvido em três situações diferentes: a aplicação do fogo prescrito em campo para uma determinada área de estudo, a simulação do fogo em laboratório com solos obtidos em uma segunda área de estudo e a comparação da simulação com o fogo prescrito aplicado em campo após um maior intervalo de tempo (2 anos) na mesma segunda área. Sendo assim a metodologia para cada um destes experimentos foram diferentes e estão organizadas separadamente neste tópico, no qual se inicia com a aplicação do fogo prescrito, em seguida relata-se a metodologia utilizada na simulação do fogo prescrito e então é descrito a comparação dos resultados da simulação com os dados do campo.

### **4.1 APLICAÇÃO DO FOGO PRESCRITO**

#### **4.1.1 Área de estudo**

O fogo prescrito foi realizado em uma propriedade destinada a pastagem na Paisagem Protegida de Corno de Bico (Figura 5), que tem sua gestão confiada ao município de Paredes de Coura. A paisagem protegida contempla 2.070 hectares, possui um relevo montanhoso, com presença de blocos de granito, está a uma altitude de 883 m e possui clima temperado, marcadamente atlântico, com alto nível de precipitação nos meses de inverno, com raros períodos de neve e temperaturas amenas nos meses mais quentes de verão.



**Figura 5:** Localização da Paisagem Protegida de Corno de Bico e da área de estudo.  
**Fonte:** Autoria Própria (2022) com base na Carta Administrativa Oficial de Portugal - CAOP (2021).

A vegetação da Paisagem Protegida de Corno de Bico, é composta em sua maioria (25%) por carvalhos relativamente jovens, que foram plantados no decorrer dos anos 40. No total, a região abriga 439 espécies de flora, sendo que várias destas possuem variados graus de endemismo.

A área de estudo em si (que está dentro do perímetro da Paisagem protegida de Corno de Bico), na qual os procedimentos de campo deste ensaio foram realizados, intitulada para fins de melhor leitura como “CEIA” (Centro de Educação e Interpretação Ambiental de Paredes de Coura), está localizada próxima a Colônia Agrícola de Chã de lamas – Vascões, com elevação de 448m, é destinada a pastagem e possui alguns pinheiros e carvalhos espalhados no terreno, predominando os matos baixos, como as gramíneas e principalmente a espécie arbustiva *Ulex europeus*, com o nome vulgar de tojo, que possui espinhos robustos e ramificados (Figura 6).



**Figura 6:** Vegetação da área de estudo - CEIA  
**Fonte:** Autoria Própria, 2022.

#### 4.1.2 Procedimentos de campo

##### 4.1.2.1 Fogo prescrito

O fogo prescrito (Figura 7) ocorreu no dia 25 de janeiro de 2023, durante o inverno, iniciando-se após o pôr do sol, as 18:15. O tipo da queima foi a condução do fogo contra declive com o intuito de replicar a queima tradicional realizada pelos pastores que tem como objetivo a gestão de território, baseado no *know-how* da comunidade.

A aplicação do fogo foi realizada pela equipe do Laboratório Rural de Paredes de Coura em conjunto com os sapadores florestais do ICNF e os bombeiros, utilizando pinga lumes com gasóleo como meio de ignição do fogo. Previamente à aplicação do fogo, as condições do ambiente foram

analisadas: velocidade (2km/h) e direção do vento (norte), humidade relativa média (70%), temperatura (7°C) e nebulosidade (céu limpo).

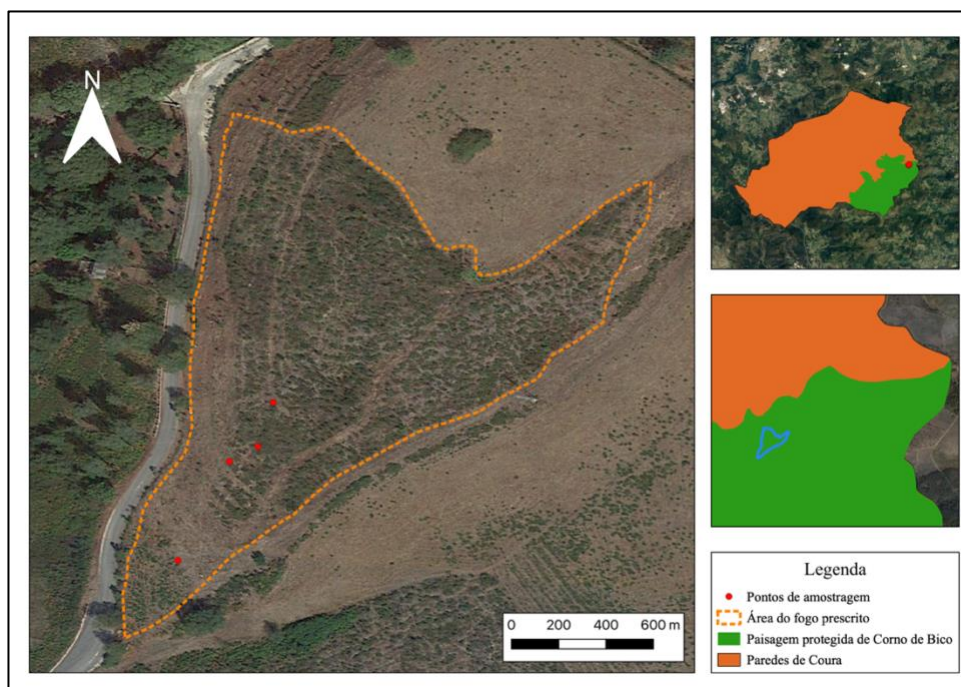


**Figura 7:** Aplicação do fogo prescrito.  
**Fonte:** Autoria própria, 2023.

#### 4.1.2.2 Parcelas e plano de amostragem

O experimento contou com dois momentos de amostragem, antes (dia 1 de dezembro de 2022) e 12 horas após (26 de janeiro de 2023) o fogo prescrito no CEIA, em quatro parcelas de amostragem (Figura 8), sendo o intervalo entre os dois momentos de um mês e 25 dias, podendo influenciar nos resultados encontrados. Inicialmente, o fogo prescrito iria ser aplicado no dia 2 de dezembro de 2023, o dia após a coleta de amostras de antes do fogo, porém devido às condições climáticas não foi possível, a vegetação estava muito úmida, dificultando a ignição e a disseminação do fogo.

Foram feitas observações de campo e coletas de amostras a fim de estudar a vegetação, propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. As coletas de solo em todos os momentos de análise seguiram a mesma metodologia.



**Figura 8:** Delimitação da área de estudo (CEIA) e pontos de amostragem.

**Fonte:** Autoria Própria (2023) com base na Carta Administrativa Oficial de Portugal - CAOP (2021) e pontos de amostragem georreferenciados por pesquisadores da Universidade de Vigo (2023).

#### 4.1.2.3 Recolha das amostras em campo

As parcelas de amostragem foram delimitadas por meio de um quadrado de metal com uma área de 0,49m<sup>2</sup> (Figura 9). Em cada ponto as espécies de plantas presentes foram identificadas. A vegetação foi cortada com uma tesoura de poda, separando a vegetação por espécies e o peso total da matéria fresca também foi medido. Uma subamostra de cada espécie foi levada ao laboratório para determinar a percentagem de humidade e quantidade de matéria seca.



**Figura 9:** Instrumento utilizado para delimitar as parcelas de amostragem.

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

Para a determinação da permeabilidade (K), densidade aparente (DAP), porosidade (P), microporosidade (MicroP), macroporosidade (MacroP), capacidade máxima de água (CMA) e capacidade de campo (CC) foi coletado em cada parcela, 100cm<sup>3</sup> de solo não perturbado, com a ajuda de um cilindro metálico, na camada 0 – 5cm.

Em relação a recolha de amostras para determinação de elementos grosseiros (EG) e propriedades químicas (pH, condutividade elétrica e matéria orgânica) abriram-se covas de até 20 cm de profundidade, onde em três profundidades diferentes (0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm) coletou-se aproximadamente 200 g de solo em cada camada e guardou-os em sacos plásticos com vedação.

#### 4.1.2.4 Análise biológica do solo

A análise biológica do solo foi feita *in loco*, por meio da medição da respiração do solo, sendo uma amostragem por parcela para antes e depois do fogo. Para este ensaio foi utilizado um sistema de análise de respiração do solo ADC/LCi-SD (número de série: 33009), no qual um *soil respiration hood* – cápsula ou câmara de respiração do solo, é acoplado a uma câmara de análise de folhas (Figura 10).

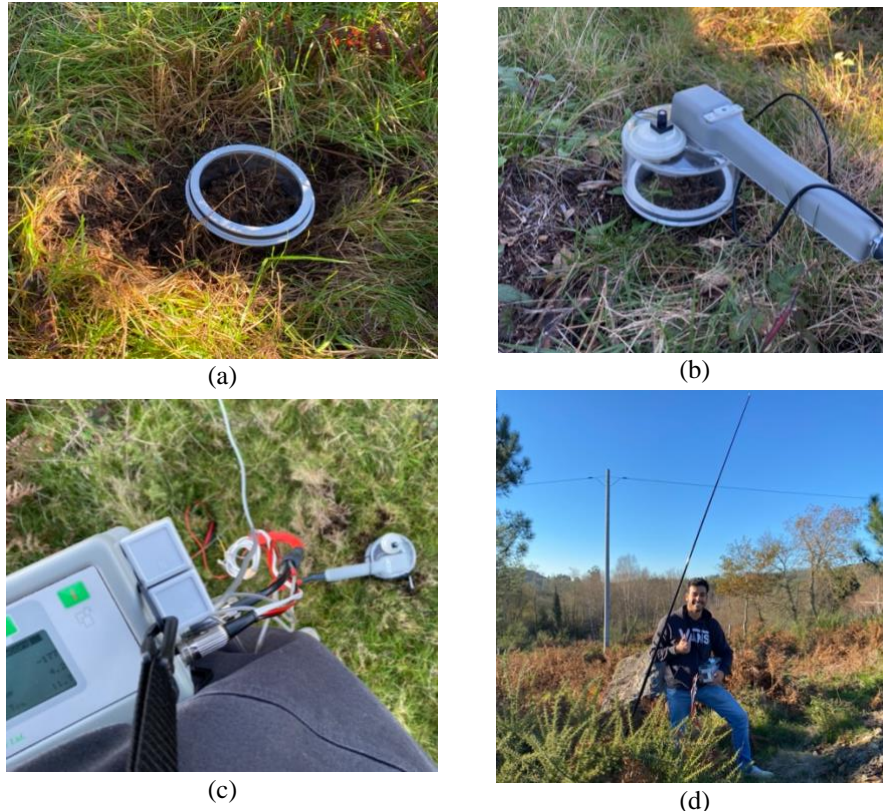
A cápsula é utilizada com um anel que deve ser primeiramente inserido no solo e então encaixado à esta, que possui uma área de 97,5 cm<sup>2</sup>, ilustrado na Figura 11. O ADC/LCi-SD é um sistema de análise de gases por infravermelho (IRGA – *Infrared Gas Analyzer*), que avalia as trocas de gases associadas a respiração da biomassa do solo.

Por parte do instrumento, para a avaliação da respiração do solo a parte principal do aparelho fornece à cápsula de respiração um fluxo controlado de ar com concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) estável. A concentração de CO<sub>2</sub> inicial é medida e então o ar é direcionado para a cápsula. O ar descarregado saindo da câmara é analisado e o nível final de CO<sub>2</sub> é determinado. Sendo assim, o resultado obtido é a taxa de troca da rede de dióxido de carbono – *Net CO<sub>2</sub> Exchange Rate* (NCER) em  $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$ .

Além disso o aparelho também mede o ar ambiente de referência, por meio de uma sonda. A leitura dos valores é feita a todo segundo, com uma análise completa podendo levar até 20 segundos, dependendo do fluxo de ar utilizado dentro da câmara.

O vento exterior no ambiente não afeta a medição dentro da câmara, devido a vedação do anel com esta. Além disso, o aparelho mede a temperatura dentro da cápsula e possui uma sonda

que permite medir a temperatura do solo. A câmara de respiração do solo dispõe de um ventilador e um suspiro que permite o controle de pressão dentro do ambiente.



**Figura 10:** Anel metálico de inserção no solo (a), câmara de respiração do solo acoplado ao analisador de folhas (b), parte central do aparelho conectada com a câmara de respiração do solo (c) e como foi-se medido a respiração com visão da sonda utilizada para obter o ar ambiente (d).

**Fonte:** Autorial Própria, 2022.

Neste experimento, seguindo recomendações do manual do equipamento e de outros experimentos já realizados (Brito et al., 2013; Kritzler, Artz e Johnson, 2016; Vermue, Elbers e Hoosbeek, 2018), o anel metálico utilizado para acoplar a câmara de respiração do solo foi inserido até a sua base, no mínimo uma hora antes da realização das medições, para evitar leituras incoerentes devido ao revolvimento e distúrbio no solo causado quando este é inserido.

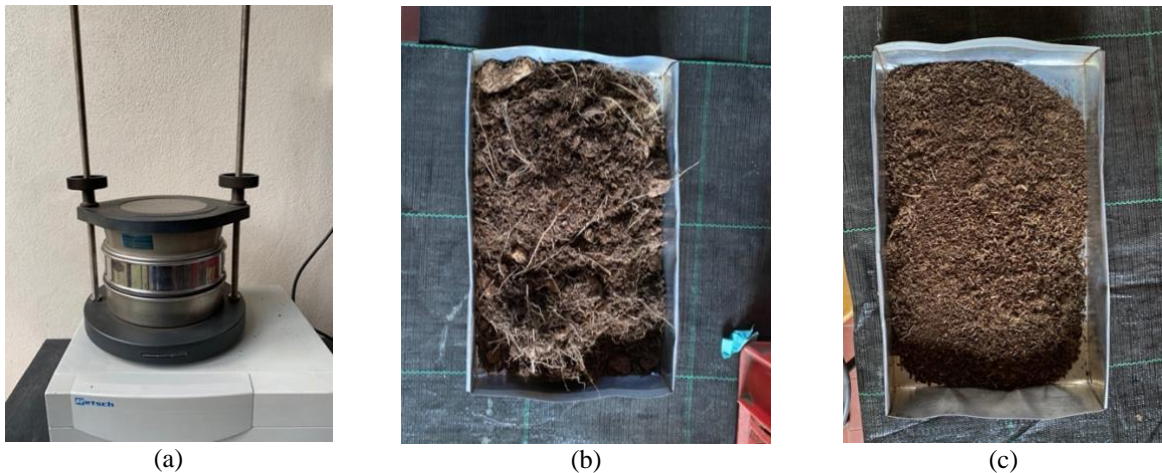
No momento da medição encaixou-se a cápsula no anel, com o fluxo de ar estabelecido em  $250\mu\text{mols/s}$  dentro desta, esperou-se 15 minutos para estabilizar o fluxo e obter valores estáveis de medição e então foram registrados um valor a cada minuto, por 5 minutos em cada parcela de amostragem.

#### 4.1.3 Procedimentos laboratoriais

A partir das amostras de solo coletadas nas parcelas de amostragem, analisou-se os EG, permeabilidade, densidade aparente, porosidade, micro e macroporosidade, capacidade máxima para água e capacidade de campo do solo, teor de humidade da vegetação no Laboratório de Solos – IPB e pH, condutividade elétrica (CE) e matéria orgânica (MO) no Laboratório Colaborativo Montanhas de Investigação (MORE).

##### 4.1.3.1 Elementos grosseiros

Para determinar os elementos grosseiros (partículas maiores de 2mm), as amostras de solo foram previamente secas a 45°C durante 48h em estufa. Após este período, cada amostra foi colocada em um crivo de malha de 2mm, com a ação de movimentos vibratórios, para a separação das partículas, onde os EG são retidos e o que passa pelo crivo é a quantidade de terra fina do solo (Figura 11).



**Figura 11:** Crivo utilizado neste experimento (a), solo antes (b) e após (c) passagem pelo crivo.

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

Para o cálculo dos (EG) foi utilizada a Equação 1.

$$\%EG = \frac{P1-P2}{P1 * \left(1 - \frac{\%H}{100}\right)} \quad (\text{Equação 1})$$

Na qual:

$P1$  = Peso da amostra seca a 45°C por 48h na estufa (g);

$P2$  = Peso da amostra na base após crivagem (terra fina) (g);

$\%H$  = percentagem de humidade presente na terra fina.

A percentagem e humidade é utilizada para a correção dos valores prévios encontrados de EG e foi obtida retirando uma subamostra de aproximadamente 10g de terra fina, anotando seu peso exato e colocando-a na estufa a 105°C por 24 horas, pesando então novamente e anotando este valor. Para se encontrar o teor de humidade foi utilizada a Equação 2.

$$\%H = \frac{P3-P4}{P4} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$P3$  = Peso da subamostra antes da estufa;

$P4$  = Peso da subamostra após a estufa.

#### 4.1.3.2 Permeabilidade

A partir das amostras de solos não perturbadas recolhidas em cilindros de 100cm<sup>3</sup>, dos dois momentos de coleta, totalizando oito amostras, foi determinada a permeabilidade saturada do solo (K). Os cilindros foram dispostos em um permeâmetro (Figura 12) de circuito fechado e carga constante.



**Figura 12:** Permeâmetro de circuito fechado e carga constante.

**Fonte:** Autoria Própria, 2022.

Quatro valores para K foram determinados ao longo de quatro dias consecutivos de medição. A medição do primeiro dia corresponde a  $K_i$  (permeabilidade inicial), e a média dos valores obtidos nos três dias seguintes é o  $K_f$  (permeabilidade final). O valor de K será calculado por meio da lei de Darcy (Equação 3), e a permeabilidade do solo será classificada utilizando as designações indicadas no Quadro 2.

$$V = K * i * A * t \quad \text{(Equação 3)}$$

Na qual:

$V$  – Volume de água que flui através da amostra ( $\text{cm}^3$ );

$K$  – Coeficiente de permeabilidade ( $\text{cm/h}$ );

$i$  – Gradiente de carga hidráulica (razão entre altura desde a superfície da lâmina de água até a base e o comprimento da amostra atravessada pelo fluxo);

$A$  – Superfície da secção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ );

$t$  – Tempo utilizado para o fluxo de água através da amostra (s).

**Quadro 2:** Classificação da permeabilidade dos solos (Figueiredo, 2011).

Classificação da permeabilidade	K (cm/h)
Muito rápida	>25,4
Rápida	12,7 – 25,4
Moderadamente rápida	6,35 – 12,7
Moderada	2,00 – 6,35
Lenta	0,5 – 2
Moderadamente lenta	0,13 – 0,5
Muito lenta	< 0,13

#### 4.1.3.3 Densidade aparente

As mesmas amostras utilizadas para os ensaios de permeabilidade foram utilizadas para a determinar a DAP. Após a análise de permeabilidade, as amostras (de volume conhecido:  $100 \text{ cm}^3$ ) foram secas a  $105^\circ\text{C}$  na estufa e então pesadas. Com os valores encontrados, foi utilizada a Equação 4 para encontrar os valores de densidade aparente.

$$Dap = \frac{P_{solo\ seco}}{vt} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

$Dap$  = densidade aparente ( $g/cm^3$ );

$P_{solo\ seco}$  = peso da amostra de solo seco a  $105^\circ C$  (g);

$Vt$  = Volume total da amostra, correspondente ao cilindro utilizado na coleta ( $100\ cm^3$ ).

#### 4.1.3.4 Capacidade máxima para água e capacidade de campo

Após o ensaio de permeabilidade, as amostras foram drenadas durante uma hora, e então pesadas, anotando o valor encontrado ( $P_{solo\ saturado}$ ). Em seguida, as amostras ficaram em repouso por 24 horas e pesadas novamente ( $P_{solo\ 24h}$ ) e então secas na estufa a  $105^\circ C$  por mais 24 horas, anotando este peso final ( $P_{solo\ seco}$ ). Com os pesos anotados, foi possível calcular a capacidade máxima para água (CMA) e a capacidade de campo (CC) seguindo as Equações 5 e 6 respectivamente (Figueiredo, 2011).

$$\%CMA = \frac{P_{solo\ saturado}}{P_{solo\ seco} - 1} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\%CC = \frac{P_{solo\ 24h}}{P_{solo\ seco} - 1} \quad (\text{Equação 6})$$

#### 4.1.3.5 Porosidade, micro e macro porosidade

Por meio do valor encontrado de CMA, calculou-se a porosidade total (P) do solo por meio da Equação 7.

$$\%P = Dap * \%CMA \quad (\text{Equação 7})$$

Seguiu-se então para o cálculo de microporosidade (MicroP) e macroporosidade (MacroP), utilizando as Equações 8 e 9, respectivamente.

$$\%MicroP = Dap * \%CC \quad (\text{Equação 8})$$

$$\%MacroP = \%P - \%MicroP \quad (\text{Equação 9})$$

#### 4.1.3.6 Análise da vegetação

A vegetação foi analisada apenas no momento antes do fogo prescrito, em relação a sua biomassa seca, teor de humidade e percentagem de cobertura em cada parcela. As amostras foram

secas na estufa a 65°C por 48h e então pesadas. Com o peso das amostras húmidas já medidas em campo e das amostras secas, foi possível determinar o teor de humidade e biomassa seca por meio das Equações 10, 11, 12 e 13.

$$\text{Teor de humidade (100\%)} = \frac{a-b}{a} * 100 \quad (\text{Equação 10})$$

$$\text{Teor de biomassa seca (\%)} = 100 - \text{teor de humidade} \quad (\text{Equação 11})$$

Sendo:

$a$  = Peso antes de ir a estufa;

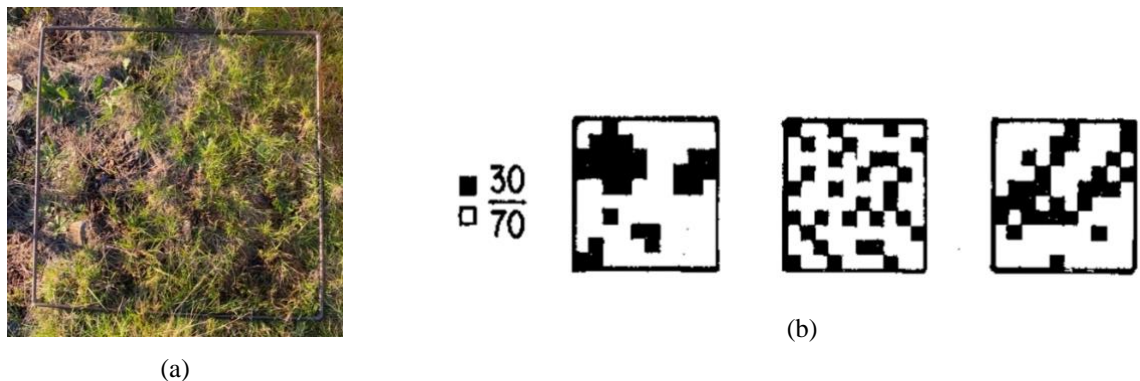
$b$  = Peso da amostra após ir à estufa;

E para encontrar a biomassa seca em kg/m<sup>2</sup>, foi utilizado o teor de biomassa seca (%).

$$\text{Biomassa seca} \left( \frac{g}{0,49m^2} \right) = \text{Biomassa total} * \frac{\text{teor de biomassa seca (\%)}}{100} \quad (\text{Equação 12})$$

$$\text{Biomassa seca} \left( \frac{kg}{m^2} \right) = \frac{\text{Biomassa seca} \left( \frac{g}{0,49m^2} \right)}{0,49*1000} \quad (\text{Equação 13})$$

Para a análise da cobertura vegetal utilizou-se da determinação visual de imagens capturadas em vista superior das parcelas, comparando-as com um guia de cobertura percentual (Anexo I), exemplificado na Figura 13. Sendo assim, as percentagens de cobertura do solo por tipo de vegetação ou solo nu, foram determinadas.



**Figura 13:** Exemplo da avaliação visual da cobertura de vegetação – parcela analisada (a) e classificação da cobertura vegetal (b).

**Fonte:** Autoria própria, 2023 (a) e Dissmeyer, 1980 (b).

#### 4.1.3.7 Matéria orgânica

A determinação do teor de matéria orgânica presente no solo (%MO) foi feita utilizando a incineração em mufla, seguindo as instruções da norma EN 13039:2011. Utilizou-se a parcela de terra fina para este experimento, obtido previamente na determinação dos EG.

As amostras foram previamente secas em estufa a 105°C por 24 horas e então pesadas aproximadamente um grama de cada amostra, anotando os valores exatos, em cadinhos de peso conhecidos que passaram pela mufla a 550 °C por 8 horas e resfriados no dessecador, para assegurar que todo o material volátil foi removido antes do início do teste.

Os cadinhos com amostras foram colocados na mufla e incinerados a 450°C por oito horas. Logo após, esperou-se atingir a temperatura ambiente dos cadinhos no dessecador (Figura 14) e pesou-os novamente com amostra, anotando seus valores.



**Figura 14:** Cadinhos com amostra após incineração, resfriando no dessecador.

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

Para o cálculo de matéria orgânica foi utilizada a Equação 14 e com os resultados encontrados, o solo foi classificado de acordo com o Quadro 3.

$$\%MO = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} * 100 \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

$m_0$  = massa do cadinho (g);

$m_1$  = massa do cadinho com amostra previamente seca (g);

$m_2$  = massa do cadinho com amostra após incineração (g).

**Quadro 3:** Classificação dos solos quanto a percentagem de matéria orgânica (Santos, 1991).

Classificação	% de MO	
	Solos ligeiros	Solos médios e pesados
Muito baixo	Inferior ou igual 0,5	Inferior ou igual a 1,0
Baixo	0,6 – 1,5	1,1 – 2,0
Médio	1,6 – 5,0	2,1 – 7,0
Alto	5,1 – 10,0	7,1 – 15,0
Muito alto	10,0 – 20	15,1 – 30
Orgânico	Superior a 20	Superior a 30

#### 4.1.3.8 pH

Para se obter o pH do solo, foi utilizado o método potenciométrico, em suspensões de solo:H<sub>2</sub>O (1:2,5) e solo:KCl (1:2,5), pelo método descrito por van Reeuwijk, L (2002), no Laboratório do MORE. Com os valores obtidos, o solo foi classificado de acordo com o seu pH em água, utilizando o Quadro 4.

**Quadro 4:** Classes do pH do solo (Costa, 1991).

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

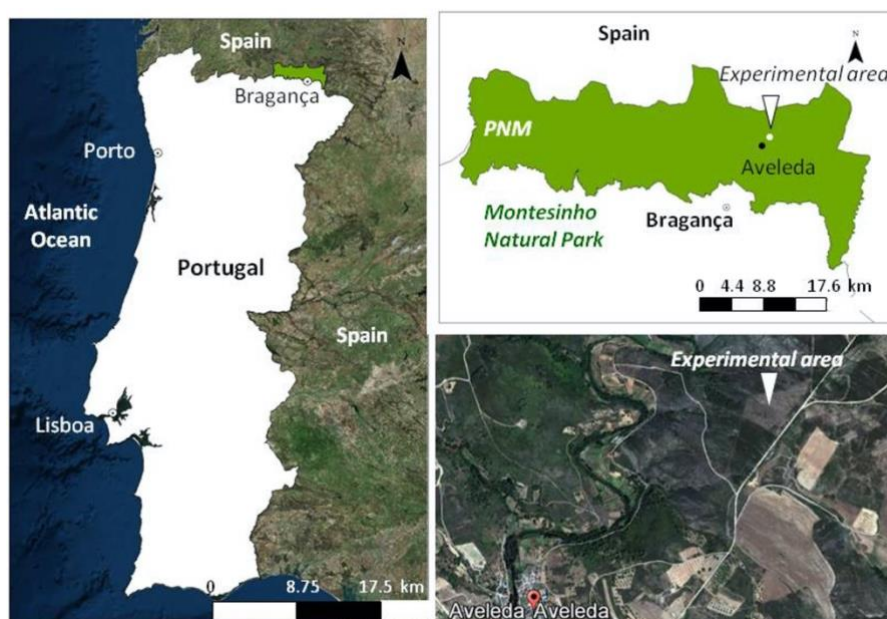
#### 4.1.3.9 Condutividade elétrica

A CE foi avaliada, experimento realizado no Laboratório do MORE, utilizando o condutivímetro, seguindo o procedimento indicado por Jone (2001) na proporção de solo:água deionizada 1:5. Após a sua agitação e filtração, a amostra foi analisada.

## 4.2 SIMULAÇÃO DO FOGO

### 4.2.1 Área de estudo

Para a simulação do fogo em laboratório, retirou-se monólitos de solo de uma região já estudada há um determinado intervalo de tempo, com propriedades físicas e químicas conhecidas onde em parte da área realizou-se dois fogos prescritos com intervalos de 10 anos entre eles, o primeiro em março de 2011 e o segundo em março de 2021. A área está localizada dentro do Parque Natural de Montesinho, uma paisagem protegida na região nordeste de Portugal, que possui uma extensão aproximada de 750 km<sup>2</sup>, próxima a aldeia de Aveleda (Figura 15) (Fonseca et al., 2017).



**Figura 15:** Região da área de estudo para coleta de monólitos destinados a simulação do fogo em laboratório.

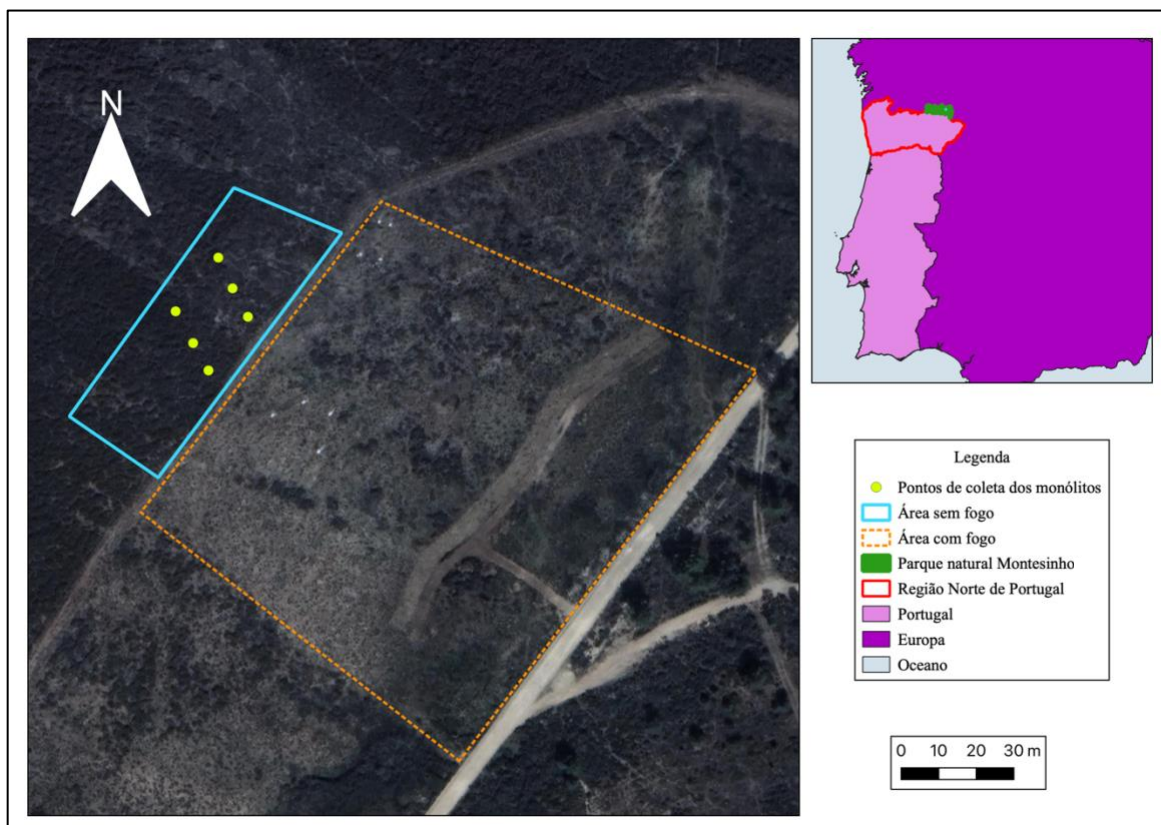
**Fonte:** Fonseca et al., 2017.

A região possui um relevo ondulado, com cumeadas aplanadas e arredondadas, de declive suave, e cotas acima de 800 metros de altitude, possui vales profundos que drenam a rede hidrográfica de aspecto temporário. A temperatura média anual é de 12°C e a precipitação média anual de 850 mm, que ocorrem principalmente nos meses de outubro e março. A zona possui uma geologia proveniente de xistos do Silúrico, formando Leptosolos úmbricos, com características pedregosas, textura mediana, ácidos e com médio a alto teor de matéria orgânica na camada superficial (Agroconsultores & Coba, 1991. FAO/UNESCO, 1998; Fonseca et al., 2017).

## 4.2.2 Procedimentos de campo

### 4.2.2.1 Parcelas e plano de amostragem

Ao lado da área em que ocorreu os dois fogos prescritos, há uma parcela que não foi queimada, está em grau superior de preservação e possui as mesmas características de solo, relevo, clima e vegetação da área em que ocorreu o fogo. Esta parcela sem fogo foi escolhida, devido ao conhecimento já existente sobre suas propriedades físicas e químicas, para a recolha de seis blocos de solo em seis pontos diferentes, que foram levados ao laboratório para se realizar a simulação do fogo (Figura 16).



**Figura 16:** Identificação da parcela sem fogo destinada a recolha das amostras de solo.  
**Fonte:** Autoria Própria (2023) com base na Carta Administrativa Oficial de Portugal - CAOP (2021).

#### 4.2.2.2 Coleta dos monólitos de solo

Os seis monólitos de solo continham um volume aproximado de 4000 cm<sup>3</sup> (Figura 17). Com caixas de metal, a recolha dos blocos foi feita da melhor maneira para diminuir o distúrbio e preservar a estrutura do solo, promovendo uma simulação mais próxima da realidade possível.



(a)



(b)

**Figura 17:** Coleta dos blocos de solo (a) e os blocos de solo após coleta (b).

#### 4.2.3 Procedimentos laboratoriais

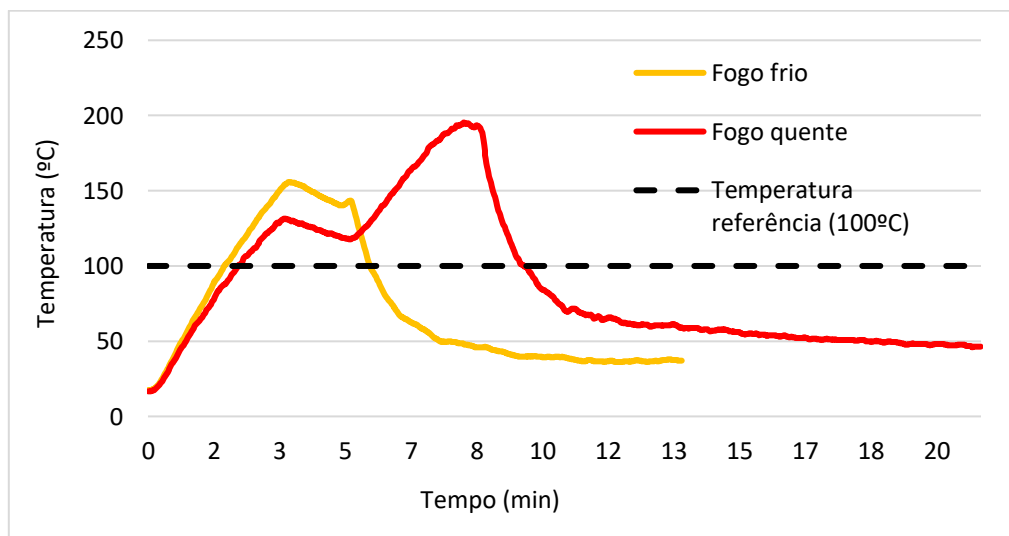
##### 4.2.3.1 Simulação do fogo

Realizou-se a simulação do aquecimento do solo causado pelo fogo em um forno (Figura 18) no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais, na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança. Inicialmente, definiu-se por meio de blocos testes de solo, o procedimento adequado para cada simulação intencional (como temperatura, curva de aquecimento e tempo de permanência no forno).



**Figura 18:** Forno utilizado na simulação do fogo.  
**Fonte:** Autoria própria, 2023.

Simulou-se fogos para duas situações diferentes: um fogo de menor aquecimento e baixa intensidade (fogo frio) para três blocos de solo, reproduzindo um fogo prescrito, no qual as amostras permaneceram no máximo quatro minutos com a temperatura acima dos 100°C na superfície do solo e um fogo com um aquecimento maior, mais intenso (fogo quente), para os três blocos restantes, permanecendo entre sete e 10 minutos acima dos 100°C na superfície do solo (Figura 19).



**Figura 19:** Comportamento da temperatura dentro do forno durante a simulação do fogo frio e do fogo quente.  
**Fonte:** Autoria própria, 2023.

Quatro termopares foram instalados nos blocos de solo, para acompanhamento da temperatura em quatro profundidades diferentes do solo (superfície, dois, cinco e nove centímetros). Os blocos foram colocados no forno e envoltos por uma manta de fibra de vidro, isolante térmica, para evitar que a incidência de calor chegasse às amostras de solo por outras direções a não ser pela superfície do solo, como o que ocorre em um fogo real. Foram instalados também três termopares de controle espalhados pelo forno (Figura 20).



**Figura 20:** Bloco de solo com as perfurações para introdução dos termopares (a) blocos de solo instalados no forno envoltos pela manta de fibra de vidro, com os três termopares de controles já instalados, dois atrás sob uma placa de metal e um à frente com cabo branco (b).

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

#### 4.2.3.2 Análise biológica do solo

Após a simulação do fogo, foi-se analisada a propriedade biológica do solo por meio da medição da respiração do solo, utilizando um sistema de análise de respiração do solo ADC/LCi-SD (número de série: 33009) (Figura 21), como o usado na primeira análise biológica deste estudo e seguindo a mesma metodologia desta.



**Figura 21:** Medição da respiração do solo nos blocos de amostras, após simulação do fogo.

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

Foi medida a respiração do solo em quatro momentos diferentes: imediatamente, 24 horas, quatro dias e uma semana após a simulação para ambas as simulações, com objetivo de acompanhar o processo de desenvolvimento da biota presente no solo após a passagem de fogos com duas intensidades diferentes.

#### 4.3 COMPARAÇÃO DO CAMPO COM A SIMULAÇÃO

Com o intuito de avaliar a evolução da biota do solo ao longo do tempo após a passagem de um fogo prescrito, este estudo também comparou valores de respiração do solo entre a simulação do fogo prescrito em laboratório com um fogo prescrito real, aplicado no campo, sendo ambos os experimentos realizados em solo da mesma área de estudo (dentro do Parque Natural de Montesinho, próximo a aldeia de Aveleda, já citada previamente neste trabalho).

Os valores de respiração do solo relacionados a simulação foram obtidos anteriormente neste mesmo estudo para o intervalo de logo após, 24 horas, quatro dias e uma semana após a simulação do fogo.

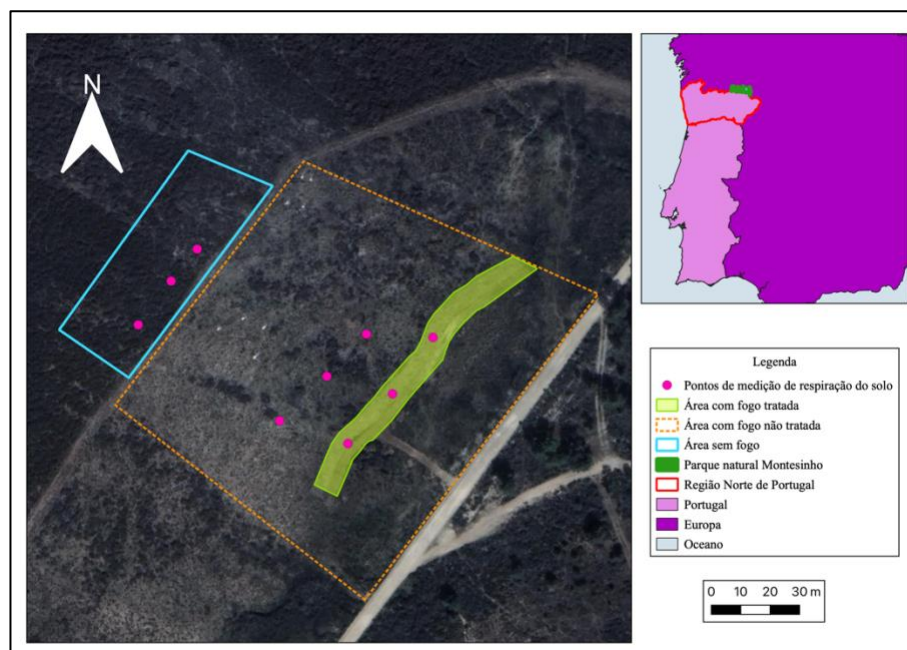
Estes dados foram comparados com outros três obtidos em campo: valores de respiração do solo para uma região tratada e outra não tratada, após dois anos da realização de um fogo prescrito e a área de controle (valores de referência – área sem queima) para avaliar a possível reestruturação do solo em relação a sua propriedade biológica, após um distúrbio.

##### 4.3.1 Procedimentos de campo

###### 4.3.1.1 Parcelas e plano de amostragem

Selecionou-se nove pontos de amostragem de respiração do solo no campo, em três parcelas distintas. Três pontos de medição se localizavam na parcela onde houve a passagem do fogo prescrito e então tratada com tecnossolo (Figura 22) (tratada), que tem como objetivo remediar a degradação do solo, promovendo um desenvolvimento e recuperação mais acelerado após um evento de perturbação do solo. A aplicação do fogo prescrito e do tecnossolo foi realizada no âmbito do projeto TERRAMATER (2022), sendo a área em questão de responsabilidade da equipa do IPB e a elaboração do tecnossolo a cargo da Universidade de Santiago de Compostela.

Outros três pontos de coleta de dados estavam na área ardida, mas sem nenhum tipo de tratamento (não tratada) e os três pontos restantes, localizavam-se na parcela da área de estudo que não houve passagem do fogo (sem fogo), como ilustrado na Figura 22.

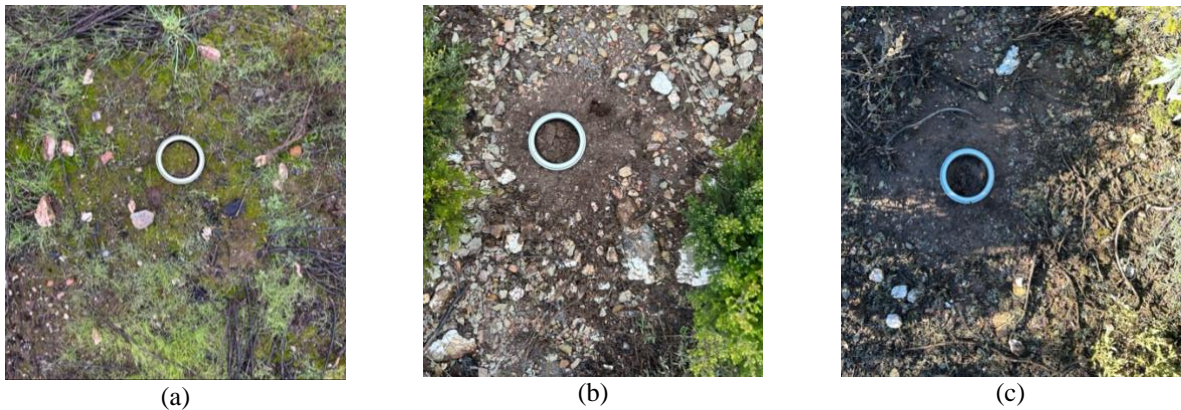


**Figura 22:** Área de amostragem com pontos de medição da respiração do solo em uma parcela que houve aplicação do fogo prescrito e foi tratada após o distúrbio, outra parcela que houve aplicação de fogo prescrito, mas não foi tratada após distúrbio e uma parcela não queimada para valores de referência.

**Fonte:** Autoria Própria (2023) com base na Carta Administrativa Oficial de Portugal - CAOP (2021).

#### 4.3.1.2 Análise biológica do solo

A análise biológica foi realizada por meio da coleta de dados relacionados a respiração do solo *in loco*, nas três parcelas de amostragem determinadas (tratada, não tratada e sem fogo) por meio de um sistema de análise de respiração do solo ADC/LCi-SD (número de série: 33009), assim como realizado nas outras duas análises biológicas deste mesmo estudo. A Figura 23 ilustra a inserção dos anéis utilizados na medição da respiração do solo nas três parcelas distintas de análise.



**Figura 23:** Anéis utilizados para acoplar a cápsula de medição de respiração do solo na parcela tratada (a), não tratada (b) e sem fogo (c).

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

#### 4.4 TRATAMENTO DE DADOS

Para o tratamento de dados, utilizou-se o software Excel para a organização e tratamento inicial dos dados, como os cálculos das médias e seus respectivos desvios padrões. Neste mesmo software, realizou-se a correlação (R) entre os parâmetros no momento inicial, para obter as condições prévias do terreno e a análise de variância (ANOVA) a um e dois fatores, dependendo das variáveis de cada parâmetro, para avaliar as interações e as possíveis mudanças que ocorreram entre os valores para antes e depois do fogo prescrito.

Com base nos valores encontrados na ANOVA, comparou-se as médias dos valores da primeira e segunda etapa deste trabalho, por meio do teste Tukey de Diferença Honestamente Significativa (HSD – *Honestly Significant Difference*), a 5% de probabilidade, pelo calculador disponível no site VassarStats (<http://vassarstats.net/anova2u.html>). Para a comparação entre as médias dos valores da taxa de respiração do solo encontrados na simulação e em campo (terceira etapa deste trabalho), realizou-se o teste Kruskal-Wallis, com mínima diferença significativa (LSD – *Least Significant Difference*) para discriminar os grupos ao nível de 0,05.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 RESULTADOS DO FOGO PRESCRITO

#### 5.1.1 Análise de variância (ANOVA)

Para as propriedades que comparam apenas o antes e depois da queima na camada superficial do solo, realizou-se a análise de variância a um fator (Quadro 5) para observar se a aplicação do fogo afetou algum desses parâmetros. Os resultados com valor de  $P < 0,05$  indicam que houve diferenças significativas entre área antes e depois da aplicação do fogo.

**Quadro 5:** Análise de variância a um fator para parâmetros analisados apenas da camada superficial do solo (0 – 5 cm) para os dois momentos diferente (antes e depois do fogo).

Parâmetros	P (GL 1)
<b>Respiração Corno de Bico</b>	<u>0,0051</u>
<b>Ki</b>	0,9735
<b>Kf</b>	0,6912
<b>DAP</b>	0,1264
<b>CMA (%)</b>	0,1086
<b>CC (%)</b>	0,1330
<b>P (%)</b>	0,2630
<b>MicroP (%)</b>	0,5640
<b>MacroP (%)</b>	<u>0,0003</u>

**Nota:** Os valores de P sublinhados correspondem a diferenças significativas entre médias das variáveis nas modalidades em comparação na ANOVA, ao nível de significância de 0,05

Já para os parâmetros que além de comparar os momentos antes e depois do fogo, analisam também as possíveis diferenças entre três camadas distintas do solo, realizou-se a análise de variância a dois fatores com repetição. Sendo que os resultados encontrados para  $P < 0,05$ , apresentados no Quadro 6 indicam diferenças significativas entre as condições analisadas.

**Quadro 6:** Análise de variância a dois fatores com repetição para parâmetros analisados em três camadas do solo (0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20 cm) e os dois momentos diferentes (antes e depois do fogo).

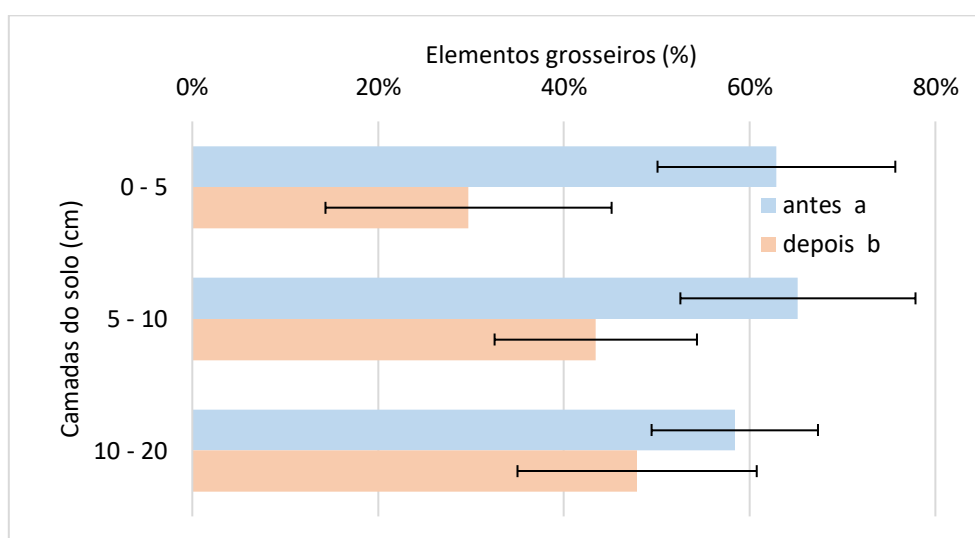
Parâmetros	P (GL 1 - momentos)	P (GL 2 - camadas)	P (GL 2 - interação)
EG	<u>0,0040</u>	0,9561	0,6527
Humidade	<u>0,0000</u>	0,2955	0,5476
CE	0,2244	<u>0,0313</u>	0,6487
pH (H <sub>2</sub> O)	<u>0,0106</u>	0,6508	0,3906
pH (KCl)	<u>0,0110</u>	0,1602	0,4053
MO	0,5343	<u>0,0027</u>	0,8073

**Nota:** Os valores de P sublinhados correspondem a diferenças significativas entre médias das variáveis nas modalidades em comparação na ANOVA, ao nível de significância de 0,05

## 5.1.2 Propriedades físicas

### 5.1.2.1 Elementos grosseiros

Os valores médios encontrados para o teor de EG entre as três camadas dos solos analisadas não obtiveram diferenças significativas entre si, se comparando cada momento separadamente, como apresentado na Figura 24. Porém analisando os dois momentos estudados, notou-se uma diferença significativa entre os valores obtidos. A média dos valores decresceram 33, 22 e 11% entre antes e depois do fogo prescrito para as camadas 0 – 5, 5 – 10, e 10 – 20cm de profundidade do solo respectivamente.



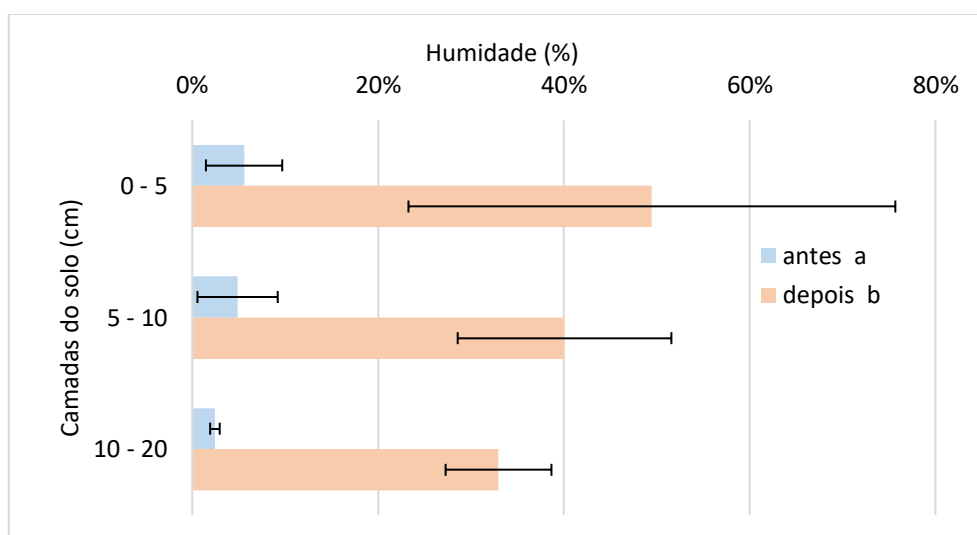
**Figura 24:** Percentagem de elementos grosseiros nas três camadas de solos analisadas nos dois momentos distintos (antes e depois do fogo prescrito).

**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

**Nota:** Médias de valores representadas por letras distintas diferem significativamente entre si, em relação ao antes e depois do fogo prescrito (Teste Tukey,  $P < 0,05$ ).

### 5.1.2.2 Humidade

Os resultados de humidade também não obtiveram diferenças significativas entre as três camadas de solo analisadas, quando observados os dois momentos separadamente. Mas comparando os momentos antes e depois da aplicação do fogo prescrito, os valores encontrados foram significativamente diferentes, com um acréscimo de 44, 35 e 31% para as camadas 0 – 5, 5 – 10 e 10 – 20cm de profundidade do solo, sendo as médias e seus respectivos desvio padrões apresentados na Figura 25.



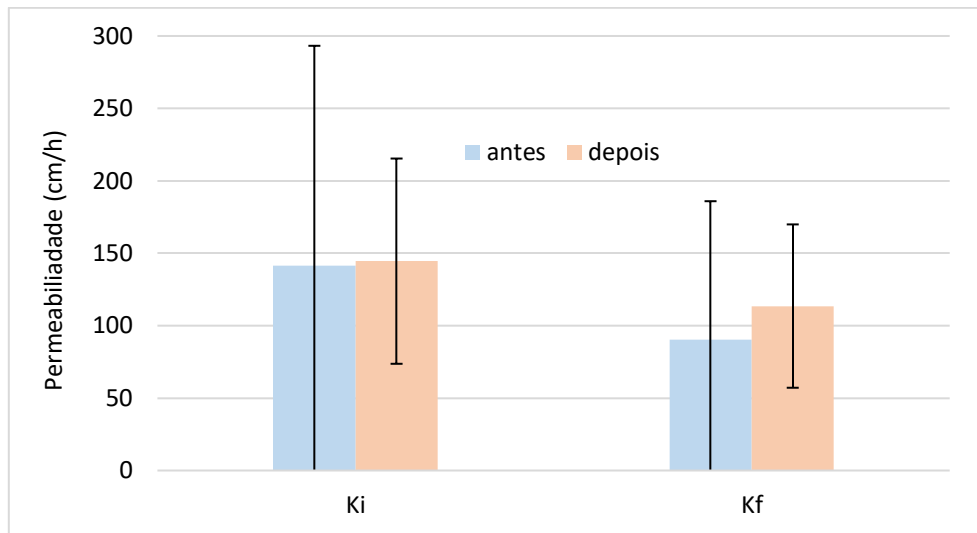
**Figura 25:** Percentagem de humidade nas três camadas de solos analisadas nos dois momentos distintos (antes e depois do fogo prescrito).

**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

**Nota:** Médias de valores representadas por letras distintas diferem significativamente entre si, quando analisado o antes e depois do fogo prescrito (Teste Tukey,  $P < 0,05$ ).

### 5.1.2.3 Permeabilidade

Ambos os valores médios de permeabilidade inicial e final entre os pontos amostrados, que são apresentados na Figura 26, não obtiveram diferenças significativas entre antes e depois da aplicação do fogo prescrito. Tanto como para a situação antes do fogo como para depois, os valores de  $K_i$  e  $K_f$  global indicaram uma permeabilidade muito rápida. Nota-se que o valor da média global de cada momento aumentou para  $K_i$  e  $K_f$ .



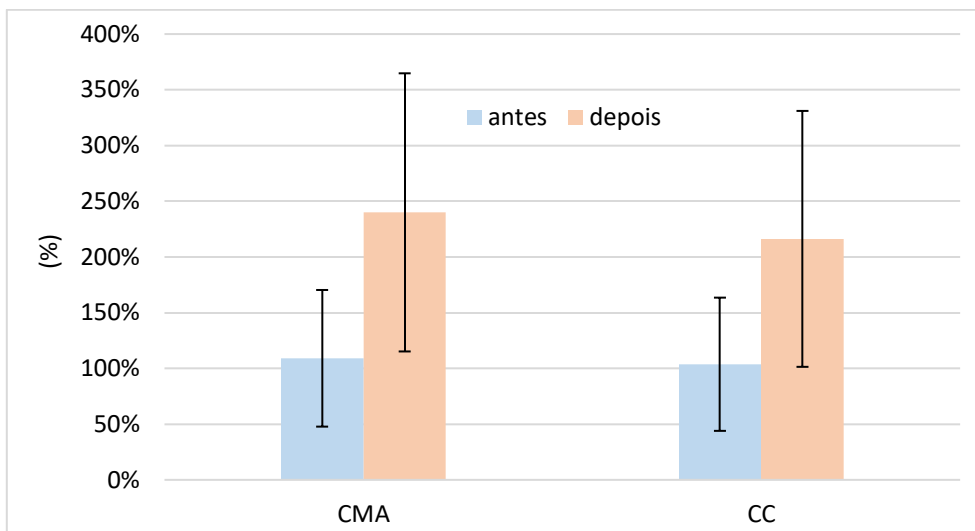
**Figura 26:** Valores obtidos de Ki e Kf para antes e depois do fogo.  
**Fonte:** Aatoria Própria, 2023.

#### 5.1.2.4 Densidade aparente

Em relação a DAP, as médias dos valores obtidos em relação aos pontos amostrados não apresentaram diferenças significativas entre antes e depois do fogo, sendo os resultados de  $0,74 \pm 0,28$  e  $0,57 \pm 0,26$  g/cm<sup>3</sup> para antes e depois da aplicação do fogo prescrito, respetivamente

#### 5.1.2.5 Capacidade máxima para água e capacidade de campo

A CMA não mostrou diferenças significativas quando comparado a média dos pontos de amostragem entre antes e depois da aplicação do fogo prescrito, apesar de se observar um aumento nos valores em relação ao momento inicial e momento final. O parâmetro de CC também não obteve diferenças significativas entre antes e depois da aplicação do fogo prescrito, o qual a sua média aumentou para depois fogo se comparado com os valores de antes, assim como a CMA (Figura 27).

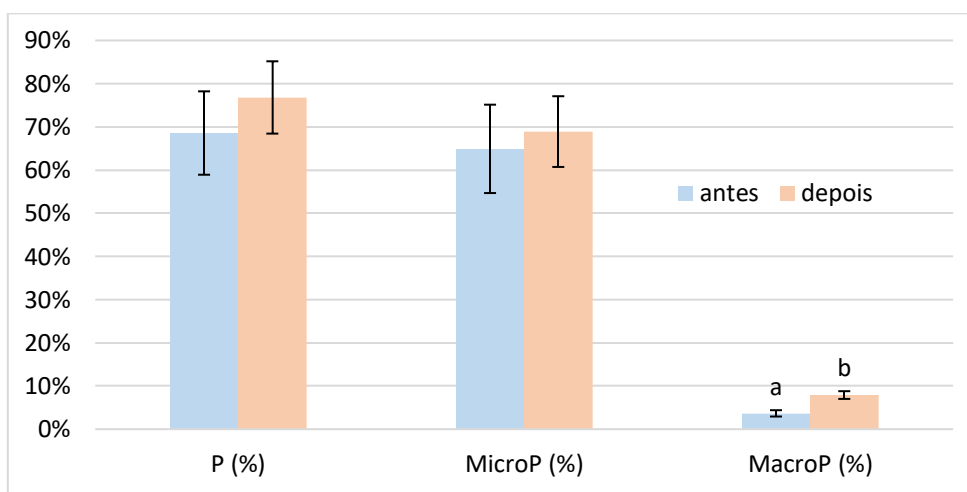


**Figura 27:** Valores obtidos de capacidade máxima de água e capacidade de campo para antes e depois do fogo.  
**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

#### 5.1.2.7 Porosidade, microporosidade e macroporosidade

O parâmetro de porosidade e microporosidade não apresentaram diferenças significativas, quando comparado os resultados de antes e depois da aplicação do fogo prescrito. A média global para os dois parâmetros aumentaram em relação ao momento inicial e final (Figura 28)

Já a macroporosidade obteve uma diferença significativa em seus valores, se comparando os resultados encontrados para antes e depois da execução do fogo prescrito. Os valores no momento final foram maiores do que os obtidos no momento inicial.

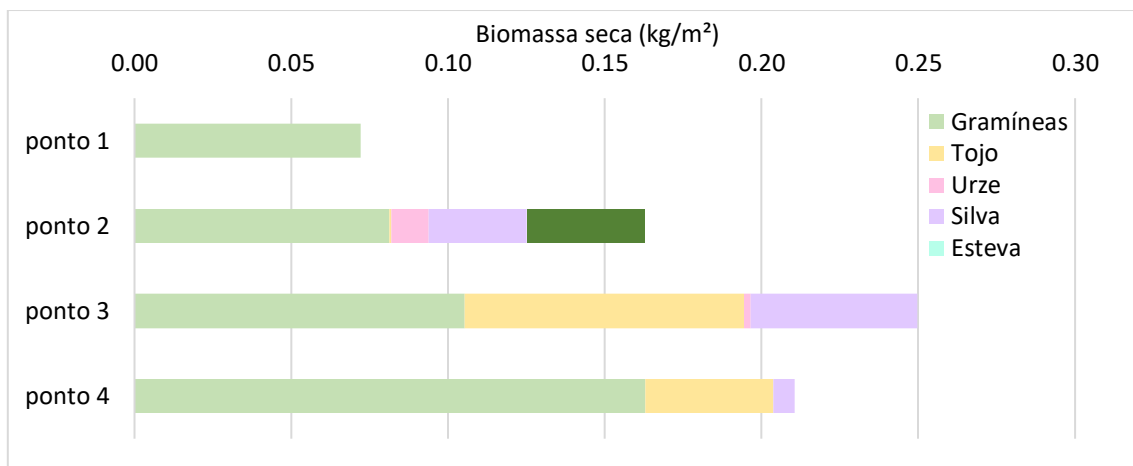


**Figura 28:** Valores obtidos de porosidade, microporosidade e macroporosidade para antes e depois do fogo.  
**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

**Nota:** Médias de valores representadas por letras distintas diferem significativamente entre si, quando comparado os valores de macroporosidade para antes e depois do fogo prescrito (Teste Tukey,  $P < 0,05$ ).

### 5.1.3 Análise da vegetação

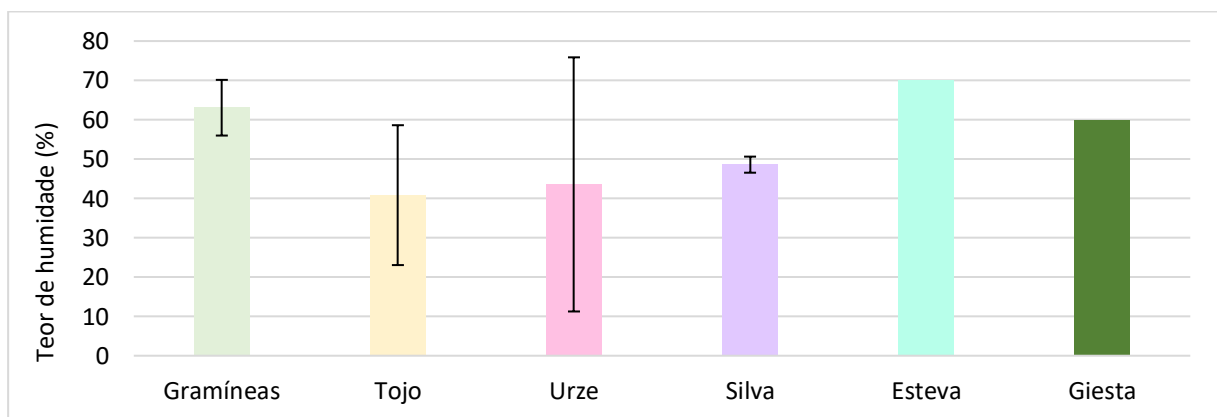
Foram encontradas 6 espécies dentre as parcelas analisadas: espécie herbácea: gramínea, espécies arbustivas: Tojo (*Ulex europaeus*), Urze (*Erica australis ssp. aragonensis*), Silva (*Rubus ulmifolius*), Esteva (*Cistus ladanifer*) e Giesta (*Genisteae*) (Figura 29). As espécies mais representativas em relação a média da biomassa encontrada nas parcelas foram a Gramínea (60,63%), Tojo (18,77%) e Silva (13,12%), respetivamente, já as menos representativas foram a Giesta (5,41%), Urze (2,02%) e Esteva (0,03%).



**Figura 29:** Quantidade de biomassa seca para cada espécie encontrada nas parcelas estudadas.

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

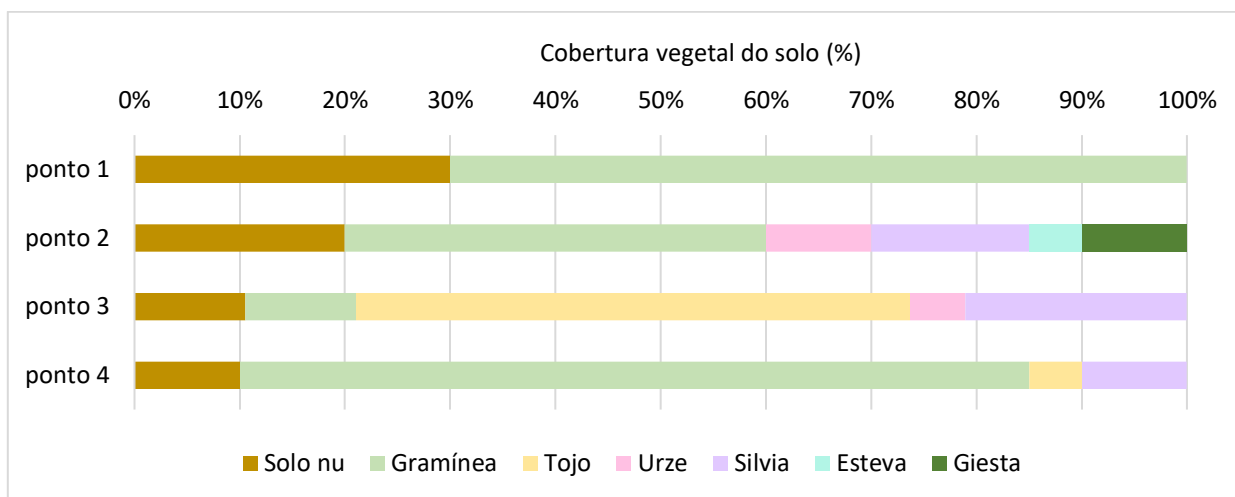
Em relação ao teor de humidade das espécies a Esteva foi a que apresentou o maior valor (70,00%) e Tojo o menor (40,83%), como ilustrado na Figura 30. Estes teores de humidade afetam na facilidade de combustão de cada espécie, refletindo em um maior ou menor impacto no solo.



**Figura 30:** Média do teor de humidade por espécie vegetal.

**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

Avaliando a percentagem da cobertura do solo, obteve-se a média total de 82,5% para a cobertura vegetal e 17,5% para solo nu, entre as parcelas analisadas, como observado na Figura 31. O ponto 3 e 4 possuem as maiores percentagens de cobertura vegetal (90% para ambos) e o ponto 1 a menor (70%).



**Figura 31:** Percentagem da cobertura vegetal por parcela analisada.

**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

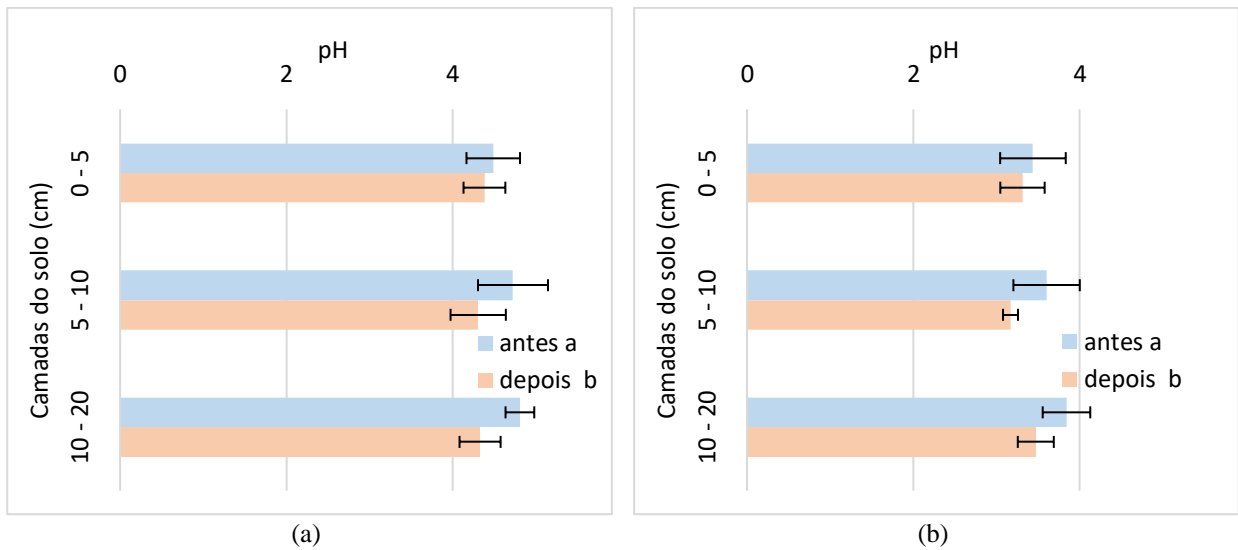
#### 5.1.4 Propriedades químicas

##### 5.1.4.1 pH

Em relação ao pH, tanto os valores encontrados utilizando como solução base a água e o cloreto de potássio obtiveram diferenças significativas apenas quando comparando o antes e depois da aplicação do fogo, e não quando comparado as três camadas diferentes de solo.

Por meio dos gráficos apresentados na Figura 32, observa-se que o pH encontrado (tanto em água como em cloreto de potássio), diminui após a aplicação do fogo, se comparado com os valores de antes, em todas as camadas analisadas.

Por meio do Quadro 4, o solo das profundidades estudadas foi classificado para antes e depois da passagem do fogo prescrito. A camada de solo mais superficial, 0 – 5 cm, foi classificada como hiperácida para ambos os momentos. Já na camada 5 – 10 cm, o solo foi classificado como ácido para antes da aplicação do fogo e hiperácido para depois. O solo da camada mais profunda analisada, 10 – 20 cm, foi classificado como ácido para antes e hiperácido para depois da passagem do fogo prescrito.



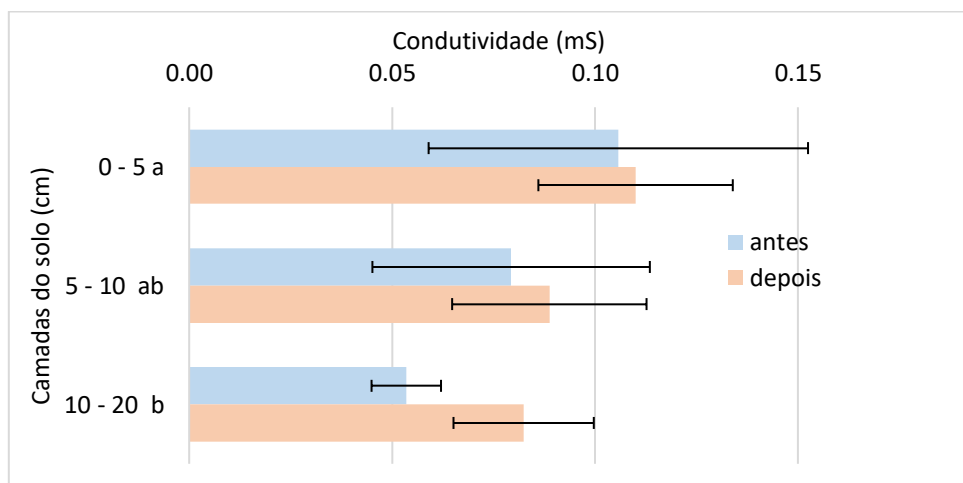
**Figura 32:** Valores obtidos de pH utilizando H<sub>2</sub>O (a) e KCl (b) como solução base, para os momentos antes e depois da aplicação do fogo prescrito.

**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

**Nota:** Médias de valores representadas por letras distintas diferem significativamente entre si, comparando os momentos antes e depois do fogo prescrito (Teste Tukey,  $P < 0,05$ ).

#### 5.1.4.2 Condutividade elétrica

Analisando a Figura 33, observa-se que no geral os valores de CE para depois do fogo são maiores do que os anteriores, porém os resultados mostram que a diferença não é significativa. Já em relação as três camadas distintas de solo analisadas, é encontrado um  $P < 0,05$ , indicando que há uma diferença significativa.



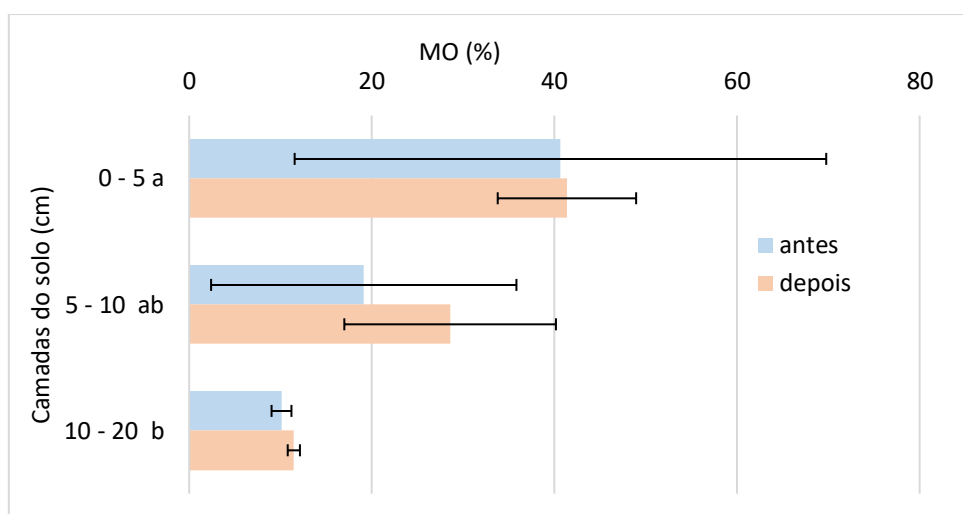
**Figura 33:** Valores de condutividade obtidos para antes e depois do fogo prescrito.

**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

**Nota:** Médias de valores representadas por letras distintas diferem significativamente entre si, em relação as camadas de solo analisadas (Teste Tukey,  $P < 0,05$ ).

### 5.1.4.3 Matéria orgânica

Os resultados obtidos para o teor de matéria orgânica (MO) no solo indicam que há uma diferença significativa apenas quando comparado as três camadas distintas de solo, mas não entre os dois momentos diferentes analisados. A Figura 34 apresenta os resultados encontrados e é possível observar a diminuição da percentagem de matéria orgânica ao longo da profundidade do solo. Além disso, apesar de não ser significativo, vê-se que depois da aplicação do fogo há um aumento no teor de MO em todas as camadas.



**Figura 34:** Valores de percentagem da matéria orgânica encontrados para antes e depois do fogo prescrito.

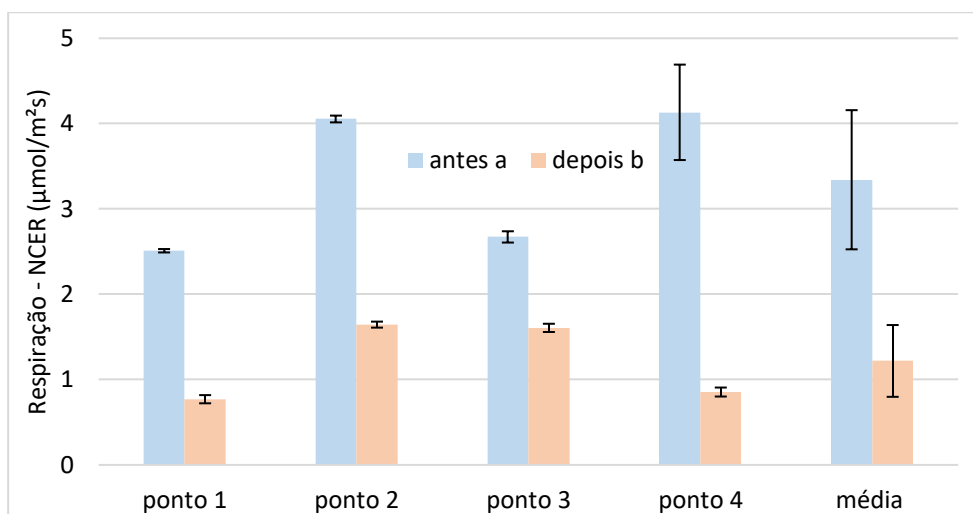
**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

**Nota:** Médias de valores representadas por letras distintas diferem significativamente entre si, em relação as camadas de solo analisadas (Teste Tukey,  $P < 0,05$ ).

O solo pode ser caracterizado, de acordo com o teor de MO encontrado e utilizando a classificação do Quadro 3 para solos ligeiros, como “orgânico” na camada mais superficial analisada (0 – 5 cm) para os dois momentos analisados. Na segunda profundidade (5 – 10 cm), para antes do fogo, o teor de matéria orgânica do solo é considerado como “muito alto” e para depois do fogo, é caracterizado como “orgânico”. Já a camada mais profunda estudada (10 – 20 cm), para antes e após o fogo, o solo é classificado como “muito alto” quanto à percentagem de matéria orgânica.

### 5.1.5 Respiração do solo

Os resultados calculados para o parâmetro de respiração do solo mostraram diferenças significativas entre antes e depois do fogo prescrito. A taxa de troca de dióxido de carbono do solo diminuiu em todos os pontos no momento final (Figura 35), sendo a maior diferença encontrada no ponto 4 (redução de 3,28  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ).



**Figura 35:** Valores de respiração do solo para antes e depois do fogo prescrito.

**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

**Nota:** Médias de valores representadas por letras distintas diferem significativamente entre si, comparando o antes e depois do fogo (Teste Tukey,  $P < 0,05$ ).

## 5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO FOGO E COMPARAÇÃO COM O CAMPO

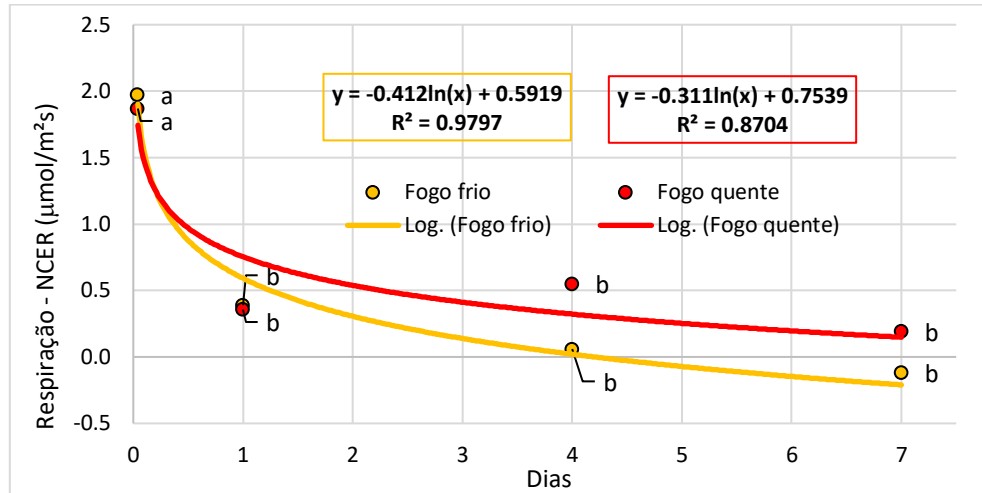
### 5.2.1 Análise de variância (ANOVA)

Com os dados de respiração do solo obtidos no experimento de simulação de fogo nos três blocos em fogo menos intenso e três blocos em fogo mais intenso, realizou-se a ANOVA e encontrou-se um  $P < 0,0001$  para a relação entre os intervalos de tempo em que foram feitas as medições. Entre as intensidades de fogo obteve-se um  $P = 0,4055$  e a interação entre os momentos de medição e a intensidade gerou um  $P = 0,6062$ .

### 5.2.2 Respiração do solo

O fogo de baixa intensidade ao longo de uma semana apresentou, no decorrer de todas as medições, uma taxa decrescente de respiração do solo. Já no fogo de alta intensidade, as duas

primeiras medições realizadas obtiveram valores menores do que o fogo de baixa intensidade, porém nas duas medições seguintes os valores subiram e ficaram maiores do que os encontrados no fogo de baixa intensidade, como observado na Figura 36.



**Figura 36:** Média dos valores de respiração do solo entre os monolitos analisados ao longo do período de logo após, 24 horas após, quatro dias após e uma semana após a simulação do fogo frio e quente, com suas respectivas equações de regressão e  $R^2$ .

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

**Nota:** Médias de valores representadas por letras distintas diferem significativamente entre si, para os diferentes momentos de medição (Teste Tukey,  $P < 0,05$ ).

Portanto, o resultado da ANOVA indica que não há diferenças significativas entre os valores obtidos entre o fogo de baixa intensidade e o de alta intensidade, mas tem-se diferenças significativas quando analisados os diferentes intervalos de tempo entre as medições após a simulação do fogo.

### 5.2.3 Comparação da respiração do solo entre o campo a simulação

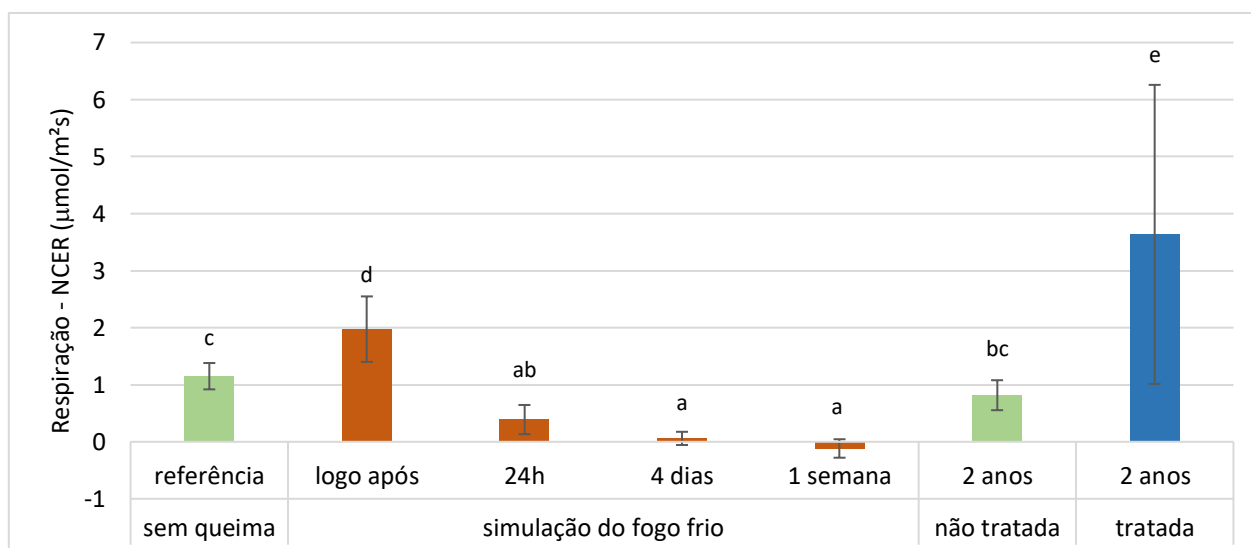
Os resultados obtidos da respiração do solo na região em que ocorreu o fogo prescrito a dois anos atrás foram de 3,64, 0,82 e 1,15  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  para a área tratada, não tratada e sem fogo respectivamente.

A comparação de valores entre a simulação do fogo frio e o estado após dois anos da aplicação real em campo pode ser observada na Figura 37. Nota-se que logo após a simulação do fogo, tem-se um aumento na taxa de troca de  $\text{CO}_2$ , que então decai no decorrer de uma semana.

Após dois anos observa-se uma recuperação da respiração do solo, se comparado com os valores obtidos para até uma semana depois da simulação do fogo.

A área tratada com tecnossolo ultrapassa o valor de referência após dois anos da queima, com um aumento de 2,49  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  na taxa de respiração do solo e a área não tratada obteve um resultado próximo ao do valor inicial, com uma diferença de 0,33  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  a menos.

O teste Kruskal-Wallis indicou diferenças significativas entre os valores da taxa de respiração do solo ( $p$  valor  $< 0,05$ ). O resultado obtido para a área de referência foi similar ao encontrado para dois anos após a queima sem tratamento. A taxa de respiração de logo após o aquecimento foi classificada em um grupo separado, assim como a área dois anos após o fogo prescrito e tratada. Já o valor encontrado para 24 horas após a simulação do fogo prescrito foi estatisticamente similar a quatro dias, uma semana e dois anos após o fogo, na área sem tratamento.



**Figura 37:** Comparação da situação referencial da respiração do solo em campo sem queima, com a simulação do fogo e a condição dois anos após o fogo prescrito em uma área tratada e não tratada.

**Fonte:** Autoria própria, 2023.

### 5.3 DISCUSSÃO

As correlações entre as propriedades físicas, para antes da aplicação do fogo prescrito na área experimental de Corno de Bico, que apresentaram valores acima de 95%, são apresentadas no Quadro 7, sendo as maiores entre CMA e CC, Porosidade e MicroP, EG e Kf de 100,00%, 99,90% e 99,12% respectivamente.

**Quadro 7:** Coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre as variáveis físicas estudadas na situação antes do fogo (apenas são apresentados os valores significativos de r,  $p < 0,05$ ).

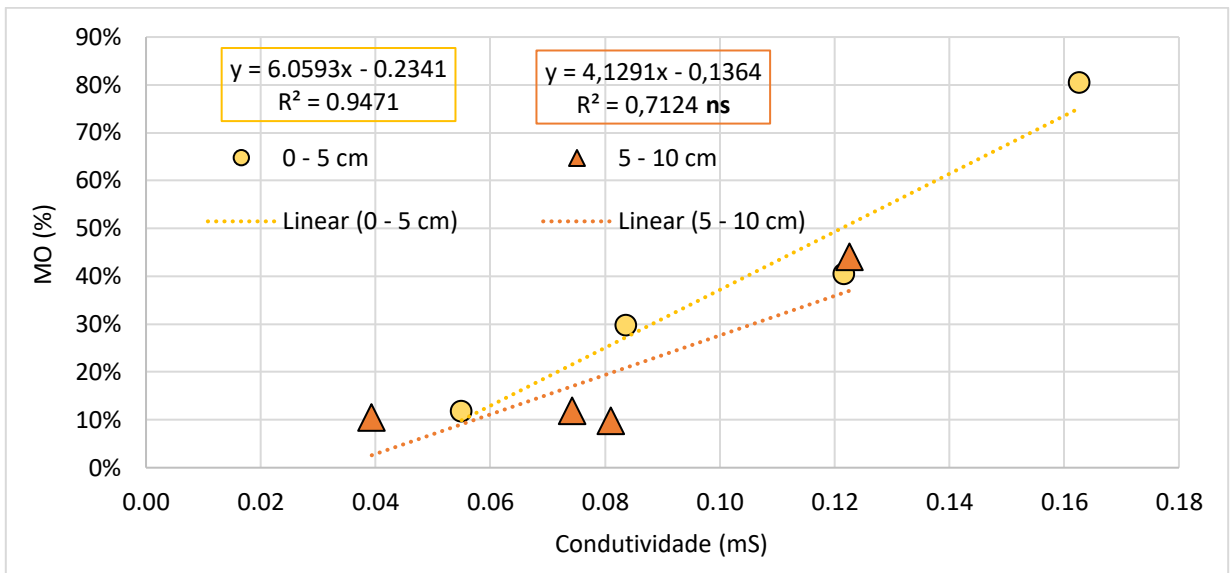
<b>Parâmetros</b>	<b>Ki (cm/h)</b>	<b>Kf (cm/h)</b>	<b>DAP (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>CMA (%)</b>	<b>CC (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>EG (%)</b>
<b>Kf (cm/h)</b>	0,965	-	-	-	-	-	-
<b>CC (%)</b>	-	-	-	1,000	-	-	-
<b>P (%)</b>	-	-	-	0,979	0,980	-	-
<b>MicroP (%)</b>	-	-	-0,961	0,975	0,976	0,999	-
<b>EG (%)</b>	-	0,991	-	0,963	0,963	-	-
<b>Humidade (%)</b>	-	-	-	0,996	0,995	0,957	0,967

Em relação as propriedades químicas, também para antes do fogo prescrito, na menor profundidade de solo analisada (0 – 5 cm) obtiveram-se correlações acima dos 95% (valor crítico de r para um nível de significância de 0,05) entre CE e teor de MO (97,31%) (Figura 39), como também foi observado por de Godoy et al. (2019) e Barros et al. (2005), os quais explicam que o maior teor de matéria orgânica promove o aumento de iões em solução, levando a uma maior CE.

Foi encontrada também uma correlação, inversamente proporcional, entre condutividade elétrica e pH em H<sub>2</sub>O (96,93 %) e KCl (95,03%) (Figura 40 e 41, respectivamente), assim como em outros estudos (Francisco et al., 2020; Fonseca et al., 2022).

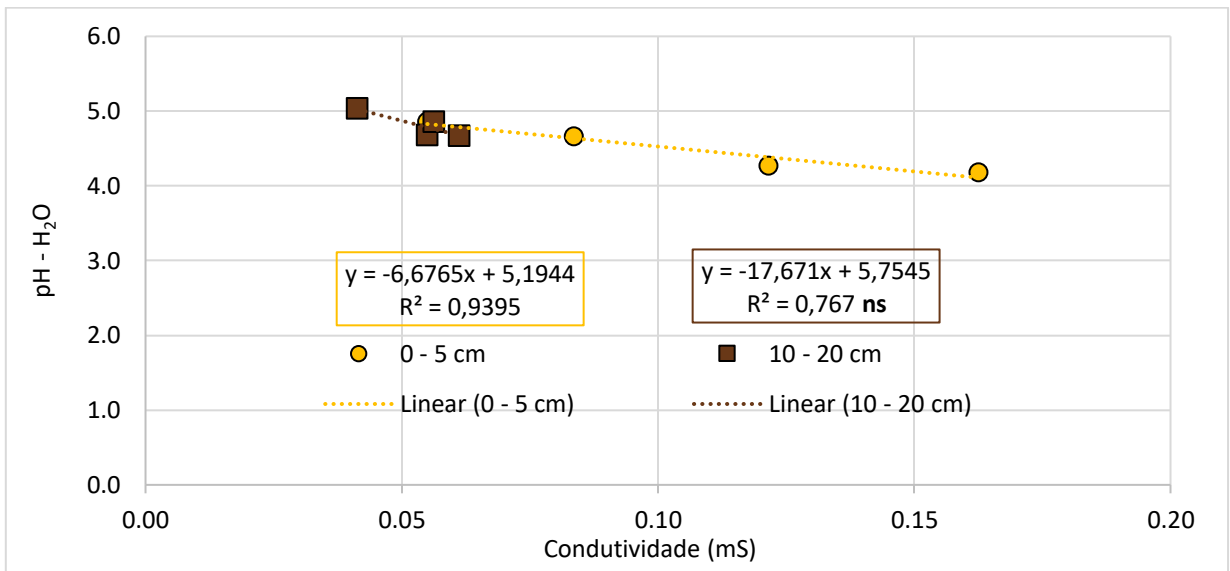
Outra correlação importante para a camada mais superficial do solo, mas não significativa (<95%), foi entre a matéria orgânica e o pH em H<sub>2</sub>O e KCl, de 88,68% e 92,14% respectivamente, sendo essas inversamente proporcionais, o mesmo observado por de Oliveira (2005) e Ebeling et al. (2008), que indicam um maior teor de matéria orgânica relacionado a uma maior acidificação do solo.

Em relação a camada 5 – 10 não se obteve nenhuma correlação entre os parâmetros químicos acima dos 95%, porém as mais significativas foram entre condutividade e MO (84,40%) (Figura 38) e condutividade e pH - KCl (92,96%, inversamente proporcional) (Figura 40). A camada mais profunda (10 – 20) também não obteve correlações acima de 95%, sendo as maiores, inversamente proporcionais, entre condutividade e pH em H<sub>2</sub>O (87,58) e KCl (78,25%) (Figura 39 e 40 respectivamente).



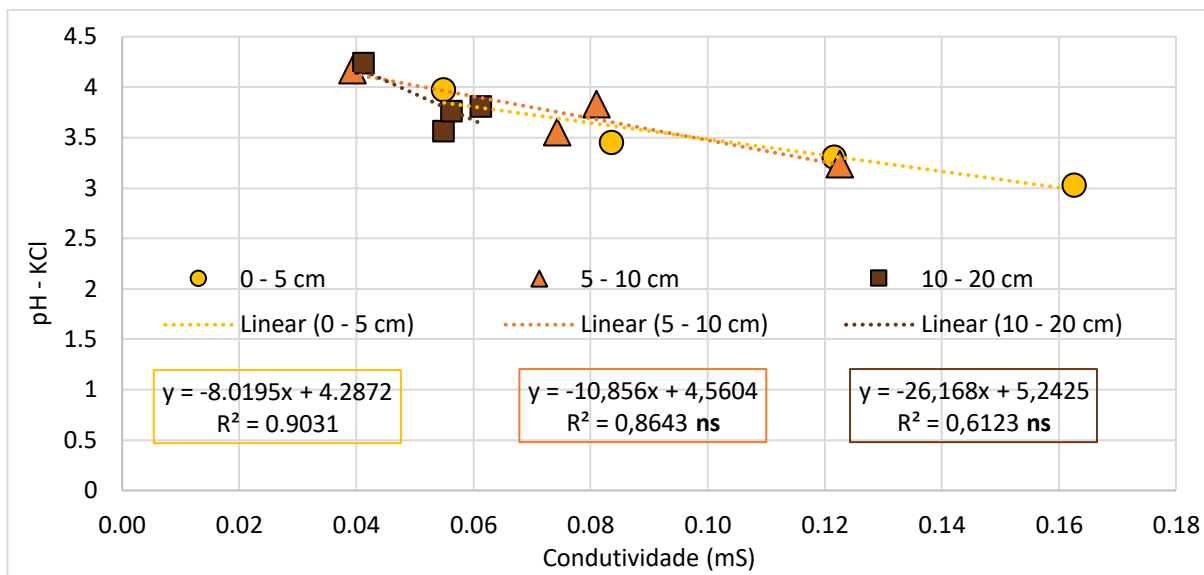
**Figura 38:** Correlação entre a condutividade e matéria orgânica para as profundidades de 0 - 5 e 5 - 10 cm do solo (ns – não significativo).

**Fonte:** Autoria própria, 2023.



**Figura 39:** Correlação entre a condutividade e o pH em H<sub>2</sub>O nas profundidades de 0 - 5 e 10 - 20 cm do solo (ns – não significativo).

**Fonte:** Autoria própria, 2023.



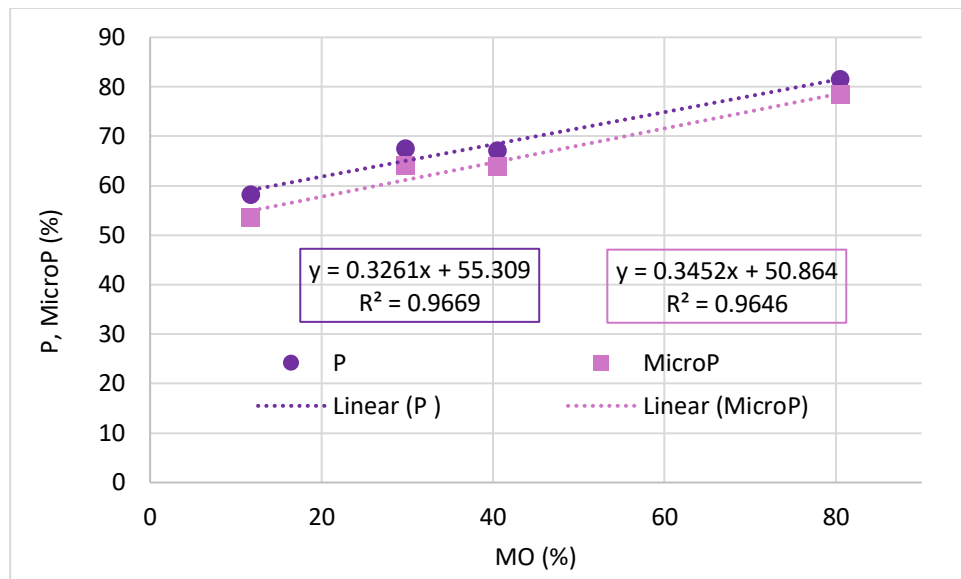
**Figura 40:** Correlação entre a condutividade e o pH em KCl nas profundidades de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm do solo (ns – não significativo).

**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

A matéria orgânica possui grande influência nas propriedades físicas do solo como demonstrado em diversos estudos. Fernandes (2019) encontrou uma correlação de 99,00% entre a MO e a DAP na profundidade de 0 – 20 cm de solo, assim como uma correlação de 99,06 e 95,00% para P e MicroP com a MO. Os trabalhos realizados por Pérez et al. (2002), de Filho et al. (2008) e Chaudhari et al. (2013) também relacionam o aumento da DAP com a diminuição de MO, que pode ser explicada pela maior quantidade de raízes no solo (Cerri et al., 1991). O aumento da densidade aparente, geralmente é acompanhado pela diminuição da MacroP e o aumento da MicroP (Stone e Silveira, 2001).

Os resultados dos estudos citados acima vão de acordo com o encontrado neste trabalho, exceto na relação entre MacroP e a MO, a qual não foi encontrada e pode ser explicada por Salton e Tomazi (2014) que citam a relação dos macroporos com a disposição dos agregados, ação da mesofauna, presença de raízes (observada em grande quantidade na área de estudo) e da expansão e contração do solo, para além da MO.

O teor de MO encontrado nas parcelas de análise de Corno de Bico para antes da aplicação do fogo prescrito, obteve uma correlação acima dos 95% com a CMA, CC, P, MicroP, EG e humidade de 99,67, 99,72, 98,33, 98,21, 97,04 e 98,74% respectivamente e inversamente proporcional com a DAP de 96,08%. A relação da MO com a porosidade total e microporosidade pode ser observada na Figura 41.



**Figura 41:** Correlação entre matéria orgânica (MO) com porosidade total (P) e microporosidade (MicroP).  
**Fonte:** Autoria Própria, 2023.

A alta correlação encontrada entre esses parâmetros com a MO e o alto teor desta nas amostras analisadas, podem explicar os altos valores encontrados de CMA, CC, P, Micro P (Figura 27 e 28 respectivamente) e o baixo valor para densidade do solo.

Após analisar as propriedades físicas e químicas na situação prévia ao fogo e considerando o intervalo de tempo entre as amostragens para antes e depois deste, assim como os eventos e condições climáticas neste período e durante a aplicação do fogo, nota-se que estes são fatores que também podem influenciar os resultados obtidos e as diferenças nos valores entre o antes e depois da queima (Paz-Ferreiro et al., 2010),

O teor de humidade encontrado no solo após 12 horas do fogo prescrito pode ser um dos fatores afetados pelas condições micrometeorológicas da área de estudo e assim interferido nos impactos do fogo no solo (Figura 26). Solos com maior humidade permitem a transferência de calor para uma maior profundidade e mais rápido, porém evitam que a temperatura ultrapasse os 100°C (Certini, 2005; Marañón-Jiménez, 2011; Leal, 2013).

Devido a queima da biomassa, resultando na adição de cinzas e nutrientes na superfície do solo, tem-se geralmente o aumento do pH (Agbeshie et al., 2022), como encontrado em diversos estudos (Dzwonko et al., 2015; Akburak et al., 2018; Francos et al., 2019; Hinojosa et al., 2021). Quanto maior a intensidade do fogo, maior a queima da biomassa, levando a um maior pH (Battle e Golladay, 2003).

Contudo, neste estudo o pH do solo obtido para após o fogo foi menor do que antes, possivelmente explicado pelo aumento, mesmo que insignificante, do teor de MO encontrado também depois da aplicação do fogo, o qual foi suficiente para diminuir do pH (Ebeling et al., 2008). A diminuição do pH foi observada em todas as camadas de solo estudadas, podendo indicar que este resultado não foi apenas influenciado pela passagem do fogo, mas como também por outros fatores, como os eventos climáticos ocorridos entre a amostragem de antes e depois do fogo prescrito.

Apenas cinco (humidade, EG, pH em H<sub>2</sub>O e KCl, macroporosidade e respiração do solo), dos 16 parâmetros analisados, obtiveram uma diferença significativa para seus valores se comparado o antes e depois do fogo. A humidade do solo provavelmente foi afetada pelas condições meteorológicas do intervalo entre a amostragem de antes e depois do fogo, o que também influenciou os resultados encontrados, por meio da Equação 1, para os EG.

Durante a aplicação do fogo prescrito, notou-se que o fogo ocorria pontualmente onde o pinga lume era aplicado, com dificuldade de dispersão. Além disso, as condições de temperatura e humidade relativa do ar, o teor de humidade do solo e da vegetação e a classificação, de acordo com o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) (2023 b), do fire weather index (FWI), índice de humidade dos combustíveis finos (FFMC), índice de húmus (DMC), índice de seca (DC), índice de propagação inicial (ISI) e índice de combustível disponível (BIU) (0,9, 82,7, 3,4, 12,4, 2,2 e 4,1 respetivamente) em relação a região mais próxima com dados disponíveis (Ponte de Lima, distrito de Viana do Castelo, assim como Paredes de Coura), permitem considerar o fogo aplicado como de baixa intensidade.

Em relação aos parâmetros de análise biológica, estes não possuem um resultado padrão após a passagem do fogo prescrito, que variam entre ecossistemas, principalmente devido aos tipos de solos, as características do fogo e os métodos usados para avaliar esta propriedade, entretanto uma diminuição na taxa de respiração do solo é geralmente observada, assim como neste estudo (Godwin, 2017; Teresa et al. 2021).

Os resultados deste trabalho mostram que a respiração do solo foi um dos parâmetros com diferenças significativas entre os dois momentos de amostragem, obtendo valores menores para após o fogo, o que contradiz o encontrado por Pinto et al. (2009), que analisou amostras de solo coletadas do Parque Natural de Cascais, depois de um incêndio florestal e após seis horas e 23 horas, os valores de respiração do solo foram maiores do que antes.

Já em um estudo, que analisou três áreas, das quais duas foram afetadas severamente pelo fogo, uma em 1992 e outra em 2008, e a terceira foi uma área de controle não queimada, numa zona de vegetação hemiboreal, na Estônia, constatou que a respiração do solo na área não queimada foi mais que o dobro do que nas áreas queimadas (Parro et al., 2019).

Plaza-Álvarez et al. (2017), avaliaram duas áreas em que foram aplicados fogos prescritos (de baixa intensidade) e uma área de controle (sem fogo), de uma região de pinus na Espanha. Em uma das áreas a respiração aumentou e em outra diminuiu, porém as diferenças não foram significativas ( $p > 0,05$ ).

Com os efeitos do fogo prescrito aplicado na CEIA sentidos em poucas variáveis, demonstra-se que esta prática pode atingir o objetivo de diminuir o risco de incêndios florestais na época da seca, com um baixo impacto no ambiente (Rego et al. 2021).

Devido a poucos estudos relacionados ao fogo prescrito, seus efeitos na respiração do solo e seu comportamento ao longo do tempo (Godwin, 2017; Parro et al., 2019), a segunda etapa deste trabalho contribui para uma análise sobre a recuperação do solo, em relação a sua biota, após este sofrer um distúrbio de baixo impacto.

Trabalhos de simulação do aquecimento do solo em laboratório, como o de Badía e Martí (2003) que simularam um aquecimento na mufla por 30 minutos a 25, 150, 250 e 500°C e o estudo realizado por Stoof et al. (2011), em que o fogo foi simulado por uma chama e a temperatura da superfície do solo variou de 482 a 1160°C, além de outros como o de Marcos et al. (1007), Terefe et al. (2008) e Zavala et al. (2010), avaliam determinados parâmetros do solo para apenas o período logo após a simulação.

Sendo assim, a comparação dos resultados obtidos com a simulação do fogo prescrito realizado neste trabalho é limitada, devido a falta de estudos que avaliam a respiração do solo em fogos de laboratórios e seus efeitos a longo prazo.

Comparando os resultados da respiração do solo para até uma semana após a simulação do fogo com aqueles obtidos em campo na região do Parque Natural de Montesinho (área com passagem do fogo prescrito e área de controle), nota-se que os valores obtidos para o solo impactado ficou próximo, mas não atingiu os valores de referência de respiração (antes do fogo), mesmo após dois anos depois do distúrbio. A diferença entre o valor de respiração do solo da área sem fogo e a área com fogo foi de  $0,33 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ .

Para a mesma região, o trabalho realizado por Fonseca et al. (2017) observou que depois de três e seis meses do primeiro fogo realizado, os valores de pH foram mais altos do que antes do fogo, porém após três anos, os valores foram similares aos de referência. Já a MO não demonstrou diferenças significativas ao longo dos três anos depois fogo prescrito, comprovando o baixo impacto deste.

Outro estudo feito por Fonseca et al. (2022), mostrou que após o fogo prescrito, também na região do Parque Natural de Montesinho, três anos após o distúrbio, o estoque de carbono na biomassa de arbustos e na camada de serapilheira ainda continuava significativamente abaixo do encontrado antes do fogo e que somente irão atingir o estado inicial em 7 anos, se continuarem seguindo as taxas médias de desenvolvimento identificadas.

O trabalho de Fonseca et al. (2017 e 2022) e Teresa et al. (2021) evidencia que as mudanças ocorridas nas propriedades de um solo, provocadas pelo fogo, mesmo que de baixo impacto, ainda são perceptíveis após um longo intervalo de tempo, assim como observado nos valores de respiração do solo obtidos neste trabalho, para após dois anos de aplicação de um fogo prescrito e que o fogo prescrito deve ser aplicado em condições ideais (temperatura amena, humidade relativa do ar adequada e pouco vento).

Entretanto, há medidas de reabilitação de áreas degradadas, que visam acelerar os processos de recuperação, se comparado com o desenvolvimento natural do ecossistema perturbado, como a revegetação de uma área em conjunto com o manejo de microrganismos simbiotes fixadores de N<sub>2</sub> e fungos micorrízicos (Mendes Filho, 2004), como a recuperação de solos feita com material dragado de lagos (Bondi, 2016), além do manejo de áreas queimadas exemplificado por Marañón-Jiménez et al. (2011), onde uma região mediterrânea foi submetida a três tratamentos diferentes após o fogo, o primeiro sendo a retirada de todas as árvores e troncos, o segundo foi a área sem intervenção e o terceiro foi onde as árvores foram derrubadas, repartidas e deixadas *in situ*, cobrindo parte do solo.

Outra forma de remediar a degradação do solo é utilizando o tecnossolo abordado por IUSS Working Group (2015), que são solos que apresentam características ideais para solucionar um problema no solo (FAO, 2006). São compostos por mais de 20% de materiais sintéticos, provenientes dos resíduos sólidos urbanos. Macías-García et al. (2015) indica que os tecnossolos são recursos que ajudam no combate contra o efeito estufa, devido a capacidade de sequestrar e armazenar carbono.

O tecnossolo foi o tratamento utilizado após o segundo fogo aplicado na área de estudo no Parque Natural de Montesinho, em uma parcela da área que presenciou o fogo prescrito. Nesta área, o valor médio de respiração do solo ( $3,64 \pm 2,62 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$ ) ultrapassou o valor de referência ( $1,15 \pm 0,23$ ), porém obteve um desvio padrão mais elevado, o que pode indicar a heterogeneidade na distribuição do tecnossolo na parcela.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que fogos prescritos podem ser uma ferramenta de baixo impacto para a prevenção de incêndio florestais, que pode diminuir de forma adequada, a quantidade de combustíveis disponíveis, assim como já exemplificado em outros estudos. Condições microclimáticas podem influenciar nas propriedades do solo, intensificando ou reduzindo o impacto do fogo. Contudo, apesar de considerar os fogos analisados neste estudo como de baixo impacto e não terem alterado significativamente muitos parâmetros do solo, seus efeitos, em algumas características, podem ainda ser sentidos após um longo período.

É observado também que as características biológicas aparentam ser uma das mais sensíveis aos distúrbios provocados no solo, onde neste trabalho, em uma parcela que mesmo após dois anos da realização de um fogo de baixo impacto, a taxa de respiração não atingiu o patamar encontrado na área de referência, sem fogo.

A aplicação de tecnossolo, como medida de reabilitação de uma área degradada, mostrou-se hábil em seu objetivo de restauração, quando analisado os resultados encontrados de taxa de respiração, os quais superaram os valores de referência. Contudo, são necessários mais estudos de comparação entre outras propriedades do solo, para verificar o funcionamento global da aplicação do tecnossolo, avaliando o desenvolvimento da área degradada (com tratamento e sem tratamento) e uma parcela de controle, sem distúrbio.

Após a simulação em laboratório dos dois fogos com intensidades diferentes, nota-se que o comportamento da taxa de respiração para ambas foi semelhante entre elas ao longo de uma semana, obtendo diferenças para apenas uma hora e 24 horas após a simulação.

No contexto das mudanças climáticas e o aumento da ocorrência de incêndios florestais, realça-se a importância de promover estudos que desenvolvam processos de baixo impacto que não alterem os processos naturais dos ecossistemas e resultem na diminuição da incidência e riscos de fogos intensos. O fogo prescrito é uma alternativa importante para o controle dos grandes incêndios florestais. Porém, haverá necessidade de aprofundar o estudo sobre os seus efeitos a longo prazo e em diversas funções ecossistêmicas do solo.

## REFERÊNCIAS

- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419-1441.
- AGIF – Agência para a Gestão Integridade de Fogos Rurais (2021). *Relatório de atividades SGIFR 2021*. Disponível em: <https://www.agif.pt/pt/relatorio-de-atividades-sgifr-2021>. Acesso em 15 de outubro de 2022.
- Agroconsultores & Coba, (1991). Carta dos Solos, Carta do Uso Actual da Terra e Carta de Aptidão da Terra do Nordeste de Portugal. UTAD/PDRITM, Vila Real.
- Akburak, S., Son, Y., Makineci, E., & Çakir, M. (2018). Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a Quercus frainetto forest. *Journal of forestry research*, 29, 687-696.
- Alexandre, C. (2015). Funções, usos e degradação do solo. In T. de Figueiredo, F. Fonseca e L. Nunes (Ed.). *Proteção do solo e combate à desertificação: oportunidade para as regiões transfronteiriças* (Cap. 1, pp. 1-14), Bragança: Instituto Politécnico de Bragança. Disponível em: [https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/17231/1/Alexandre\\_2015\\_Funções\\_usos\\_e\\_degradação\\_do\\_solo.pdf](https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/17231/1/Alexandre_2015_Funções_usos_e_degradação_do_solo.pdf). Acesso em 25 de abril de 2022.
- Araújo, E. A., & Ribeiro, G. A, 2005. *Ecosystemas florestais*. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Edson-Araujo/publication/242167267\\_IMPACTOS\\_DO\\_FOGO\\_SOBRE\\_A\\_ENTOMOFAUNA\\_DO\\_SOLO\\_EM\\_ECOSISTEMAS\\_FLORESTAIS1\\_Fire\\_Impacts\\_on\\_the\\_Entomofauna\\_of\\_the\\_Soil\\_in\\_Forest\\_Ecosystems/links/54a0cb650cf267bdb90169b4/IMPACTOS-DO-FOGO-SOBRE-A-ENTOMOFAUNA-DO-SOLO-EM-ECOSISTEMAS-FLORESTAIS1-Fire-Impacts-on-the-Entomofauna-of-the-Soil-in-Forest-Ecosystems.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Edson-Araujo/publication/242167267_IMPACTOS_DO_FOGO_SOBRE_A_ENTOMOFAUNA_DO_SOLO_EM_ECOSISTEMAS_FLORESTAIS1_Fire_Impacts_on_the_Entomofauna_of_the_Soil_in_Forest_Ecosystems/links/54a0cb650cf267bdb90169b4/IMPACTOS-DO-FOGO-SOBRE-A-ENTOMOFAUNA-DO-SOLO-EM-ECOSISTEMAS-FLORESTAIS1-Fire-Impacts-on-the-Entomofauna-of-the-Soil-in-Forest-Ecosystems.pdf) Acesso em 28 de junho de 2022.
- Badía, D., & Martí, C. (2003). Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Research and Management*, 17(1), 23-41.
- Baretta, D., et al. (2005). Efeito do monocultivo de pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no Planalto Sul Catarinense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29, 715-724. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/ZDy7q3cr73xCYrs8qHbBQhL/abstract/?lang=pt> Acesso em 28 de junho de 2022.
- Batmanian, G. J. (1983). *Efeitos do fogo sobre a produção primária ea acumulação de nutrientes do estrato rasteiro de um cerrado*. UnB.
- Berlinck, C. N., et al. (2021). The Pantanal is on fire and only a sustainable agenda can save the largest wetland in the world. *Brazilian Journal of Biology*, 82. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/vJXtjDhPMggc33J4rSnQCvC/?format=pdf&lang=en> Acesso em 15 de junho de 2022.
- Bernardi (2020, dezembro 4). *Por que o solo é tão importante quanto a água e o ar?* EMBRAPA. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/57867457/artigo-por-que-o-solo-e-tao-importante-quanto-a-agua-e-o-ar>. Acesso em 26 de abril de 2022.
- Bondi, G., Capra, G. F., Macci, C., Ceccanti, B., Grilli, E., Vacca, S., ... & Masciandaro, G. (2016). Biochemical performance of degraded soil recovered by lake-dredged materials (LDM) as pedotechnomaterials. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 1871-1888.
- Bowman, D. M., et al. (2009). Fire in the Earth system. *science*, 324(5926), 481-484. Disponível em: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.1163886> Acesso em 14 de junho de 2022.

- Brammer, H., & Nachtergaele, F. O. (2015). Implications of soil complexity for environmental monitoring. *International Journal of Environmental Studies*, 72(1), 56-73. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207233.2014.967509> Acesso em 18 de maio de 2022.
- Brito, P., Trujillo, J. L., Morales, D., Jiménez, M. S., & Wieser, G. (2013). Soil moisture overshadows temperature control over soil CO<sub>2</sub> efflux in a *Pinus canariensis* forest at treeline in Tenerife, Canary Islands. *Acta oecologica*, 48, 1-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1146609X13000076> Acesso em 23 de novembro de 2022.
- Burger, J. A., & Kelting, D. L. (1999). Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest ecology and management*, 122(1-2), 155-166. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378112799000390?token=89229E3C3B675B606C30CE6DC431FEAEBCE93DA13E0A3490D8AA46B7063DAFC62CEDF506807F678044BB676DAE331F6D&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220518133633> Acesso em 18 de maio de 2022.
- Campbell, G. S., et al. (1994). Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil science*, 158(5), 307-313. Disponível em: [https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1994/11000/PREDICTING\\_THE\\_EFFECT\\_OF\\_TEMPERATURE\\_ON\\_SOIL.1.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1994/11000/PREDICTING_THE_EFFECT_OF_TEMPERATURE_ON_SOIL.1.aspx) Acesso em 16 de junho de 2022.
- CAOP – Carta Administrativa Oficial de Portugal, 2021. *Direção-Geral do território*, dados abertos. Disponível em: <https://www.dgterritorio.gov.pt/dados-abertos> Acesso em 15 de outubro de 2022.
- Carrer Filho, R. (2022). *Actinomicetos como agentes de biocontrole de doenças e como promotores de crescimento do tomateiro*. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/10112>. Acesso em 25 de abril de 2022.
- Carvalho, L. C. O., (2014). Prevenção e detecção de incêndios. Tese de doutoramento em Física, pelas Universidades do Minho, Aveiro e Porto – MAPFIS.
- Castro, A. C. M., Meixedo, J. P., Vivas, A., (2010b). *Avaliação do impacto do fogo controlado na vulnerabilidade dos solos florestais* – uma contribuição. Centro de Investigação Em Geo-Ambiente e Recursos, CIGAR FEUP, Faculdade de Engenharia Da Universidade Do Porto. Disponível em [https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/4935/1/ART\\_AMC\\_2010\\_DMA.pdf](https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/4935/1/ART_AMC_2010_DMA.pdf) Acesso em 23 de setembro de 2022.
- CBMGO – Corpo de Bombeiro Militar de Goiás, 2017. *Prevenção e combate a incêndios florestais*. Disponível em: <https://www.bombeiros.go.gov.br/wp-content/uploads/2015/12/MOB-FLORESTAL.pdf> Acesso em 13 de setembro de 2022.
- Cerri, C. C., Feller, C., & Chauvel, A. (1991). Evolução das principais propriedades de um latossolo vermelho escuro após desmatamento e cultivo por doze e cinquenta anos com cana-de-açúcar. *Cahiers Orstom. Série Pedologie*, 26(1), 37-50.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1-10. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00442-004-1788-8.pdf> Acesso em 31 de maio de 2022.
- Champ, P. A., & Brenkert-Smith, H. (2016). Is seeing believing? Perceptions of wildfire risk over time. *Risk Analysis*, 36(4), 816-830.
- Chaudhari, P. R., Ahire, D. V., Ahire, V. D., Chkravarty, M., & Maity, S. (2013). Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(2), 1-8.
- Choromanska, U., & DeLuca, T. H. (2002). Microbial activity and nitrogen mineralization in forest mineral soils following heating: evaluation of post-fire effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(2), 263-271. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071701001808> Acesso em 28 de junho de 2022.

Costa, J.B. 1991. Caracterização e Constituição do Solo. Lisboa. Fundação Calouste Gulbenkian.

Costa, F. D. S., et al (2004). Aumento de matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. *Ciência Rural*, 34, 587-589. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/tvPkrK4z3jRQyQcsB9xvHNP/?format=pdf&lang=pt> Acesso em 30 de maio de 2022.

Costa, E. et al. (2013). Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. *Enciclopédia biosfera*, 9(17). Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/materia%20organica.pdf> Acesso em 25 de maio de 2022.

Cunha, T. J. F., et al. (2015). Matéria orgânica do solo. *Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE)*. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1034986/1/Tony2015.pdf> Acesso em 19 de maio de 2022.

DeBano, L. F., et al. (1998). *Fire effects on ecosystems*. John Wiley & Sons. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=cFxtriC2EDkC&oi=fnd&pg=PR15&dq=fire%27s+effects+on+ecosystems&ots=lzCr7rQRcd&sig=i1YfyDJyTXx-2hwELg54yZftNc#v=onepage&q=fire's%20effects%20on%20ecosystems&f=false> Acesso em 25 de maio de 2022.

Decaëns, T., Jiménez, J. J., Gioia, C., Measey, G. J., & Lavelle, P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42, S23-S38. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1164556306000409?token=421ED6199BAC2CD5DD378A1F91AE6B13FD514A130EF284BC3945A5EA212ABC87A66B4165F408F495445773E1E9A4461&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220504162813> Acesso em 04 de maio de 2022.

De Godoy, F. O., Bernardi, A. D. C., Rossi, F., & Bueno, J. D. A. (2019). Mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo e sua relação com matéria orgânica e granulometria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 48., 2019, Campinas, SP. Anais... Campinas, SP: SBEA, 2019. CONBEA..

De 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>. Acesso em 25 de abril de 2022.

de Oliveira, I. P., COSTA, K. D. P., dos Santos, K. J. G., & Moreira, F. P. (2005). *Considerações sobre a acidez dos solos de cerrado*. EMBRAPA

De Souza Oliveira Filho, J et al. (2019). Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. *Journal of Arid Environments*, 166, 1-10. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0140196319300357?token=AD3D4BFE084049D31F9F04B7F5D534D0C25BF2086A651D674850638FA3F4D483881EC51192B5A5ABC8EB1544774A5&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220610133146> Acesso em 10 de maio de 2022.

Dissmeyer, G. E. (1980). *A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land* (Vol. 11). USDA-Forest Service, Southeastern Area.

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2136/sssaspepub35.c1> Acesso em 17 de maio de 2022.

Durigan, G., & Ratter, J. A. (2016). The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. *Journal of Applied Ecology*, 53(1), 11-15. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1365-2664.12559>. Acesso em 25 de setembro de 2022

Dzwonko, Z., Loster, S., & Gawroński, S. (2015). Impact of fire severity on soil properties and the development of tree and shrub species in a Scots pine moist forest site in southern Poland. *Forest Ecology and Management*, 342, 56-63.

EEA - Environmental European Agency, 2019. *Solos e objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas*. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/sinai-da-aea/sinai-2019/infografia/solos-e-objetivos-de-desenvolvimento/view> Acesso em 15 de junho de 2022.

European Commission. (2011). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Youth Opportunities Initiative. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/10592331.pdf> Acesso em 10 de junho de 2022.

Evans, J., & Geerken, R. (2004). Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of arid environments*, 57(4), 535-554. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S01401963001216> Acesso em 10 de junho de 2022.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. *State of knowledge of soil biodiversity*. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb1928en/cb1928en.pdf> Acesso em 04 de maio de 2022.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. *Revised World Soil Character*. Disponível em: <https://www.fao.org/3/I4965E/i4965e.pdf> Acesso em 25 de junho de 2022.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006. *World Reference base for soil resource. A framework for international classification, correlation and communication*. Disponível em: <https://www.fao.org/3/a0510e/a0510e.pdf>. Acesso em 13 de março de 2023.

FAO/UNESCO, (1998). Soil Map of the World, Revised Legend, Amended 4th Draft. FAO, Roma.

Fernandes, F. (2018). *Efeito do abandono em propriedades físico-químicas do solo em lameiros do Parque Natural de Montesinho* (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico de Bragança (Portugal)).

Fernandes, P. M. (2002). *Desenvolvimento de relações preditivas para uso no planeamento de fogo controlado em povoamentos de Pinus pinaster Ait* (Doctoral dissertation, Dissertação de Doutoramento, UTAD, Vila Real). Disponível em: [http://publicationslist.org/data/pfern/ref-51/Fernandes\\_PhD\\_Final.pdf](http://publicationslist.org/data/pfern/ref-51/Fernandes_PhD_Final.pdf) Acesso em 25 de setembro de 2022.

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

Filho, L. C. A. L., de Oliveira, E. L., de Faria, M. A., & de Bastos Andrade, L. A. (2008). Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). *Revista Ciência Agronômica*, 39(2), 193-202.

Filkov, A. I., Ngo, T., Matthews, S., Telfer, S., & Penman, T. D. (2020). Impact of Australia's catastrophic 2019/20 bushfire season on communities and environment. Retrospective analysis and current trends. *Journal of Safety Science and Resilience*, 1(1), 44-56. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666449620300098> Acesso em 15 de junho de 2022.

Fonseca, F., Silva, D., Bueno, P., Hernández, Z., Royer, A. C., & de Figueiredo, T. (2022). Temporal dynamics of carbon storage in a Mediterranean mountain scrubland managed by prescribed fire. *Catena*, 212, 106107.

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.

- Fontúrbel, T., Carrera, N., Vega, J. A., & Fernández, C. (2021). The effect of repeated prescribed burning on soil properties: A review. *Forests*, 12(6), 767.
- Franco, M., Stefanuto, E. B., Úbeda, X., & Pereira, P. (2019). Long-term impact of prescribed fire on soil chemical properties in a wildland-urban interface. Northeastern Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment*, 689, 305-311.
- Georia Foresrtry Commission, 2010. *2010 Anual Report*. Disponível em: <https://gatrees.org/wp-content/uploads/2020/01/GFC-2010-Annual-Report.pdf> Acesso em 16 de junho de 2022.
- GLOBO, 2021. *Grécia e Itália sofrem com incêndios florestais e temperaturas acima de 40°C*. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia/2021/08/01/grecia-e-italia-sofrem-com-incendios-florestais-e-temperaturas-acima-de-40c-veja-video-do-combate-ao-fogo.ghtml> Acesso em 15 de junho de 2022.
- Godwin, D. R., Kobziar, L. N., & Robertson, K. M. (2017). Effects of fire frequency and soil temperature on soil CO<sub>2</sub> efflux rates in old-field pine-grassland forests. *Forests*, 8(8), 274.
- Hernández, T., Garcia, C., & Reinhardt, I. (1997). Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils. *Biology and fertility of soils*, 25, 109-116.
- Higuera, P. E., & Abatzoglou, J. T. (2021). Record-setting climate enabled the extraordinary 2020 fire season in the western United States. *Global change biology*, 27(1). Disponível em: 15/06 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.15388> Acesso em 15 de junho de 2022.
- Hinojosa, M. B., Albert-Belda, E., Gómez-Muñoz, B., & Moreno, J. M. (2021). High fire frequency reduces soil fertility underneath woody plant canopies of Mediterranean ecosystems. *Science of The Total Environment*, 752, 141877.
- Hoffland, E. et al. (2020). Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant and Soil*, 455(1), 1-22. Disponível em <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11104-020-04651-9.pdf> Acesso em 18 de maio de 2022.
- Huffman, E. L., et al. (2001). Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range. *Hydrological Processes*, 15(15), 2877-2892. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.379> Acesso em 16 de junho de 2022.
- ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2010. *Manual para formação de brigadista de prevenção e combate aos incêndios florestais*. Brasília. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/servicos/sejaumbrigadista.pdf> Acesso em 13 de setembro de 2022.
- ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 2015. *6º Inventário Florestal Nacional*. Disponível em: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/c8cc40b3b7ec85413> Acesso em 26 de abril de 2022.
- ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 2017. *2º Relatório extraordinário provisório de incêndios florestais*. Disponível em: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/ef21cfb40e6fa33e>. Acesso em 13 de maio de 2022.
- ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 2021. *8º Relatório Provisório de Incêndios Rurais. Divisão de Gestão do Programa de Fogos Rurais*. Disponível em: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/504914cdd1a211bb> Acesso em 13 de junho de 2022.
- ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 2022. *5º Relatório Provisório de Incêndios Rurais*. Disponível em: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/82022cfe3a10f2e3> Acesso em 12 de setembro de 2022.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2022. *Programa queimadas – Situação atual*. <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/situacao-atual/> Acesso em 14 de setembro de 2022.

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2023 a. *Índice Meteorológico de Incêndio (FWI) e Probabilidade de extremos* – mapa dinâmico. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/riscoincendio/fwi/#contenttop>. Acesso em 13 de março de 2023.

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2023 b. *MF2 - Dados mais recentes*. Disponível em: <http://mf2.ipma.pt/downloads/> Acesso em 13 de março de 2023.

IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. *International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports No. 106. Rome: FAO.

Jone, B. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC Press. Boca Raton.

Kallenbach, C. M., Frey, S. D., & Grandy, A. S. (2016). Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nature communications*, 7(1), 1-10. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms13630.pdf> Acesso em 30 de maio de 2022.

Kauffman, J. B., Cummings, D. L., & Ward, D. E. (1994). Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian cerrado. *Journal of ecology*, 519-531. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2261261> Acesso em 25 de junho de 2022.

Keane, R. E. (2015). *Wildland fuel fundamentals and applications* (pp. 1-191). New York, NY, USA: Springer International Publishing.

Khormali, F., & Ajami, M. (2011). Pedogenetic investigation of soil degradation on a deforested loess hillslope of Golestan Province, Northern Iran. *Geoderma*, 167, 274-283. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706111002321> Acesso em 10 de junho de 2022.

Keeley, J. E., & Fotheringham, C. J. (2001). Historic fire regime in southern California shrublands. *Conservation Biology*, 15(6), 1536-1548. Disponível em: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1523-1739.2001.00097.x> Acesso em 14 de setembro de 2022.

Kraft, N. J., Adler, P. B., Godoy, O., James, E. C., Fuller, S., & Levine, J. M. (2015). Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Functional ecology*, 29(5), 592-599.

Kritzler, U. H., Artz, R. R. E., & Johnson, D. (2016). Soil CO<sub>2</sub> efflux in a degraded raised bog is regulated by water table depth rather than recent plant assimilate. *Mires & Peat*, 17.

Kottasová, I., 2021. *Incêndios florestais se espalham pelo mundo e atingem novas regiões*. CNN. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/incendios-florestais-se-espalham-pelo-mundo-e-atingem-novas-regioes/> Acesso em 15 de junho de 2022.

Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *BioScience*, 60(9), 708-721. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article/60/9/708/238009?login=false> Acesso em 03 de maio de 2022.

Leal, M. (2013). A importância das condições de humidade do solo na repartição intra-anual dos eventos danosos de cheia: o caso da Área Metropolitana de Lisboa. In *VI Congresso Nacional de Geomorfologia* (pp. 37-40).

Lloret, F. et al. (2009), Wildfires, in J. C. Woodward (ed.), *The Physical Geography of the Mediterranean*. Oxford University Press, Oxford, 541–558.

Mallik, A. U., et al. (1984). Ecological effects of heather burning: I. Water infiltration, moisture retention and porosity of surface soil. *The Journal of Ecology*, 767-776. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2259530> Acesso em 16 de junho de 2022.

Macías-García, F.; Nieto, C.; Otero, X. L.; Verde, J. R.; Arbestain, M. C.; Vázquez, F. M. (2015). Recuperación de aguas, suelos y ecosistemas con nuevas tecnologías: tecnosoles biocarbones y humedales reactivos. *Seminário Solos contaminados – Tecnologias e Soluções de Remediação*.

Marañón-Jiménez, S., Castro, J., Kowalski, A. S., Serrano-Ortiz, P., Reverter, B. R., Sánchez-Cañete, E. P., & Zamora, R. (2011). Post-fire soil respiration in relation to burnt wood management in a Mediterranean mountain ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 261(8), 1436-1447.

Marcos, E., Tárrega, R., & Luis, E. (2007). Changes in a Humic Cambisol heated (100–500 C) under laboratory conditions: the significance of heating time. *Geoderma*, 138(3-4), 237-243.

Marques, P. A. R. (2020). *Efeitos do fogo controlado na composição e estrutura de comunidades de pequenos mamíferos não-voadores (Ordens Didelphimorphia e Rodentia) no cerrado brasileiro* (Doctoral dissertation). Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/48091> Acesso em 29 de maio de 2022.

Marques, S., et al. (2011). Characterization of wildfires in Portugal. *European Journal of Forest Research*, 130(5), 775-784. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-010-0470-4> Acesso em 16 de setembro de 2022.

Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. M. (2011). Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews*, 109 (1-2), 44-60. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825211001322>. Acesso em 25 de setembro de 2022.

Mbagwu, J. S. (2003). Environmental control of soil structure in Mediterranean soils. *Lecture given at the college on soil physics. LNS0418023*, 255-259.

MEA – Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*. World Resources Institute. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.48.aspx.pdf> Acesso em 28 de abril de 2022.

Meira Castro, A. C., Meixedo, J. P., & Vivas, A. (2010). Avaliação do impacto do fogo controlado na vulnerabilidade dos solos florestais—uma contribuição. Disponível em: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/4935>. Acesso em 16 de setembro de 2022.

Mendes Filho, P. F. (2004). *Potencial de reabilitação do solo de uma área degradada, através da revegetação e do manejo microbiano* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Molchanov, E. N., Savin, I. Y., Yakovlev, A. S., Bulgakov, D. S., & Makarov, O. A. (2015). National approaches to evaluation of the degree of soil degradation. *Eurasian soil science*, 48(11), 1268-1277. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1064229315110113.pdf> Acesso em 04 de maio de 2022.

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* (Doctoral dissertation). Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/25116> Acesso em 28 de abril de 2022.

Moritz, M. A., et al. (2004). Testing a basic assumption of shrubland fire management: how important is fuel age?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(2), 67-72. Disponível em: 14/09 <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1890/1540-9295%282004%29002%5B0067%3ATABAOS%5D2.0.CO%3B2> Acesso em 14 de setembro de 2022.

Mroz, G. D., et al. (1980). Effects of fire on nitrogen in forest floor horizons. *Soil Science Society of America Journal*, 44(2), 395-400. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1980.03615995004400020038x> Acesso em 20 de junho de 2022.

- Nortcliff, S. (2002). Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 161-168. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0167880901002535?token=2F1A2EC3A40BD7F47D6D23B45AFF09D79982C01AF80907361BB3102546CDBCBCCE56BFE0CC8C2A89081D738722C15F14B&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220518141030> Acesso em 18 de maio de 2022.
- NWCG – National Wildfire Coordinating Group, 2020. *Extreme Fire Behavior*. Disponível em: <https://www.nwcg.gov/term/glossary/extreme-fire-behavior> Acesso em 15 de setembro de 2022.
- Parro, K., Köster, K., Jogiste, K., Seglinš, K., Sims, A., Stanturf, J. A., & Metslaid, M. (2019). Impact of post-fire management on soil respiration, carbon and nitrogen content in a managed hemiboreal forest. *Journal of environmental management*, 233, 371-377.
- Pausas, J. G. (2004). Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Climatic change*, 63(3), 337-350. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:CLIM.0000018508.94901.9c> Acesso em 15 de junho de 2022.
- Paz-Ferreiro, J., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., Seoane, S., & Gil-Sotres, F. (2010). Effect of management and climate on biochemical properties of grassland soils from Galicia (NW Spain). *European Journal of Soil Biology*, 46(2), 136-143.
- Penman, T. D., et al. (2013). Defining adequate means of residents to prepare property for protection from wildfire. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 6, 67-77. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2212420913000435?token=2A3D158B84EE93F593166B6ECF0C60F86AC23167A09DFA29CCC4E0C94CE01C41952F3AA3E9781DCAFC9E0D3FC51E3EF9&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220610150941> Acesso em 10 de junho de 2023.
- Pereira, P. et al. (2016). Past and present post-fire environments. *The Science of the Total Environment*, 573, 1275-1277. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0048969716309718?token=73A7F2A739D74D994E472FE0C1D62B1787BC1D04D1B98557C1BAD9E683A869360C0BB7A746753554CA75731106BCD05D&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220615154359> Acesso em 15 de junho de 2022.
- Pérez Gomar, E., Reichert, J. M., Reinert, D. J., & García, F. (2002). Atributos do solo e biomassa radicular após quatro anos de semeadura direta de forrageiras de estação fria em campo natural dessecado com herbicidas. *Revista brasileira de ciência do solo*, 26, 211-223.
- Piazza, G. et al. (2020). Long-term conservation tillage and nitrogen fertilization effects on soil aggregate distribution, nutrient stocks and enzymatic activities in bulk soil and occluded microaggregates. *Soil and Tillage Research*, 196, 104482. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719871930100X> Acesso em 10 de junho de 2022.
- Plaza-Álvarez, P. A., Lucas-Borja, M. E., Sagra, J., Moya, D., Fontúrbel, T., & De las Heras, J. (2017). Soil respiration changes after prescribed fires in Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) monospecific and mixed forest stands. *Forests*, 8(7), 248.
- Pinto, R. et al., (2009). *Recuperação de um solo florestal queimado por aplicação de resíduos orgânicos. Respiração induzida por substrato dos microrganismos do solo* (Doctoral dissertation).
- Pyne, S. J. (1996). *Introduction to wildland fire. Fire management in the United States*. John Wiley & Sons. Disponível em: [https://books.google.pt/books/about/Introduction to Wildland Fire.html?id=QDaiwAEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.pt/books/about/Introduction%20to%20Wildland%20Fire.html?id=QDaiwAEACAAJ&redir_esc=y) Acesso em 10 de junho de 2022.
- 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, 381-392.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/jkprVJMw5mKbKjd9G4xyQ4p/?format=pdf&lang=pt> Acesso em 16 de junho de 2022.

Rego, F. C., Morgan, P., Fernandes, P., & Hoffman, C. (2021). *Fire science: from chemistry to landscape management*. Springer Nature.

Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2006). Propriedades físicas do solo. *Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria*. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/337498761\\_Reinert\\_Reichert\\_-\\_Propriedades\\_fisicas\\_do\\_solo](https://www.researchgate.net/publication/337498761_Reinert_Reichert_-_Propriedades_fisicas_do_solo) Acesso em 18 de maio de 2022.

Rheinheimer, D. D. S., et al. (2003). Modificações nos atributos químicos de solo sob campo nativo submetido à queima. *Ciência Rural*, 33, 49-55. Disponível em: 20/06 <https://www.scielo.br/j/cr/a/NtcWLnJxsrwVssRnFX6LHQ/?format=pdf&lang=pt> Acesso em 20 de junho de 2022.

Ribeiro, L., et al. (2012). Mapeamento do risco de incêndios florestais no município de Novo Mundo, Mato Grosso, Brasil. *Cerne*, 18, 117-126. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/tSznMT44QSWd835wjgWk5dM/?lang=pt> Acesso em 13 de setembro de 2022

Rodrigues, C. A. G. (1999). Efeitos do fogo e da presença animal sobre a biomassa aérea e radicular, nutrientes do solo, composição florística, fenologia e dinâmica de um campo de capim-carona (*Elyonurus muticus* (Spreng.) O. Ktze.) no Pantanal (sub-região de Nhecolândia). *Embrapa Pantanal-Tese/dissertação (ALICE)*. Disponível em: 16/06 <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/800178> Acesso em 16 de junho de 2022.

Rome: FAO, 2015. *Status of the world's soils resources: main report*. Rome: FAO. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf>. Acesso em 26 de abril de 2022.

Salton, J. C., & Tomazi, M. (2014). *Sistema radicular de plantas e qualidade do solo*. EMBRAPA.

Santos, J.Q. 1991. *Fertilização – Fundamentos da utilização dos adubos e correctivos*. Publicações Europa América, Mem Martins.

Santos, D., et al. (1992). Queimadas e erosão do solo. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte*, 16(176), 62-68. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Wenceslau-Teixeira/publication/313209909\\_Queimadas\\_e\\_Erosao\\_do\\_Solo/links/5b085577aca2725783e5d84e/Queimadas-e-Erosao-do-Solo.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wenceslau-Teixeira/publication/313209909_Queimadas_e_Erosao_do_Solo/links/5b085577aca2725783e5d84e/Queimadas-e-Erosao-do-Solo.pdf) Acesso em 28 de junho de 2022.

Sawamoto, T., Hatano, R., Yajima, T., Takahashi, K., & Isaev, A. P. (2000). Soil respiration in Siberian taiga ecosystems with different histories of forest fire. *Soil Science and Plant Nutrition*, 46(1), 31-42.

Scariot, A., et al. (2005). *Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação*. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://jbb.ibict.br/bitstream/1/361/1/2005%20Scariot%20et%20al%20-%20cerrado%20ecologia%20biodiversidade%20e%20conservacao.pdf> Acesso em 14 de junho 2022.

Scharenbroch, B. C., et al. (2012). Two decades of low-severity prescribed fire increases soil nutrient availability in a Midwestern, USA oak (*Quercus*) forest. *Geoderma*, 183, 80-91. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706112001231> Acesso em 13 de junho de 2022.

Schoenholtz, S. H et al. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest ecology and management*, 138(1-3), 335-356. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378112700004230?token=C1CE60AF02A18329460890AC8E38524076B1A250B52D40BAA38199031B97A43B679FE30D9CE86C9FE9B32EF72E6F0DF1&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220519152050> Acesso em 19 de maio de 2022.

Scott, A. C., & Glasspool, I. J. (2006). The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(29), 10861-10865.

- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S., de Moraes Sa, J. C., & Albrecht, A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22(7-8), 755-775. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885974/document> Acesso em 19 de maio de 2022.
- Shakesby, R. A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 71-100. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S001282521100002X?token=34AEDC65551AF8231B920D9BEF1F1FC0C61CB65C659B638889BAF3AB111F5D992156D9119427EF6150EF6F60CBBB1A15&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220913161840> Acesso em 13 de setembro de 2022.
- Steuter, A. A., & McPherson, G. R. (1995). Fire as a physical stress. In 'Wildland plants: physiological ecology and developmental morphology'. (Eds DJ Benundah, RE Sosebee) pp. 550–579. *Society for Range Management*: Denver, CO.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons.
- Stone, L. F., & Silveira, P. D. (2001). Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25, 395-401.
- Stoof, C. R., De Kort, A., Bishop, T. F., Moore, D., Wesseling, J. G., & Ritsema, C. J. (2011). How rock fragments and moisture affect soil temperatures during fire. *Soil Science Society of America Journal*, 75(3), 1133-1143.
- Interreg España – Portugal. (2023). *Medidas innovadoras de recuperación preventiva en áreas quemadas*. TERRAMATER. Disponível em: <https://2007-2020.poctep.eu//pt-pt/2014-2020/medidas-innovadoras-de-recuperación-preventiva-en-áreas-quemadas>. Acesso em 20 de março de 2023.
- Ulery, A. L., et al. (1993). Wood-ash composition and soil pH following intense burning. *Soil science*, 156(5), 358-364. Disponível em: [https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1993/11000/WOOD\\_ASH\\_COMPOSITION\\_AND\\_SOIL\\_PH\\_FOLLOWING\\_INTENSE.8.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1993/11000/WOOD_ASH_COMPOSITION_AND_SOIL_PH_FOLLOWING_INTENSE.8.aspx) Acesso em 25 de junho de 2022.
- Utset, A., & Cid, G. (2001). Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil and Tillage Research*, 61(3-4), 193-202. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198701002045> Acesso em 16 de junho de 2022.
- Vamstad, M. S., & Rotenberry, J. T. (2010). Effects of fire on vegetation and small mammal communities in a Mojave Desert Joshua tree woodland. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1309-1318. Disponível em: 14/06 <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S014019631000100X?token=203E40DC74A8BE563749FFD64386511B8DE6517630251AB1CC22AB9913112ABB17A79FEA18D4ABC9F7643D8C626A3D21&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220614131925> Acesso em 14 de junho de 2022.
- Vasu, D., et al. (2018). A conceptual model of natural land degradation based on regressive pedogenesis in semiarid tropical environments. *Land Degradation & Development*, 29(8), 2554-2567. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ldr.3000> Acesso em 10 de junho de 2022.
- Vega, J. A., Pérez-Gorostiaga, P., Cuiñas, P., Fonturbel, M. T., & Fernández, M. C. (2001). Manual de queimas prescritas para matogueiras de Galicia. *Xunta de Galicia: Santiago de Compostela, Spain*.
- Vermue, E., Elbers, J., & Hoosbeek, M. (2018). A comparative field study of four soil respiration systems. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/120659> Acesso em: 1 de março de 2023.
- Walstad, J. D. et al. (Eds.) (1990). *Natural and prescribed fire in Pacific Northwest forests*. Corvallis, OR: Oregon State University Press.

Wei, W., Weile, C., & Shaopeng, W. (2010). Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: Global patterns and responses to temperature and precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(8), 1236-1244.

Weldmichael, T. G., Michéli, E., Fodor, H., & Simon, B. (2020). The influence of depth on soil chemical properties and microbial respiration in the upper soil horizons. *Eurasian Soil Science*, 53(6), 780-786. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1064229320060137.pdf> Acesso em 19 de maio de 2022

Wessels, K. J., et al. (2007). Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of arid environments*, 68(2), 271-297. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014019630600190X> Acesso em 10 de junho de 2022.

WWF. (2022). *Sustentabilidade*. Disponível em: [https://www.wwf.org.br/participe/porque\\_participar/sustentabilidade/](https://www.wwf.org.br/participe/porque_participar/sustentabilidade/). Acesso em 25 de abril de 2022.

Zaïdel'man, F. R. (2000). Hydrological factor of anthropogenic degradation of soils and the methods of its control. *Pochvovedenie*, (10), 1272-1284. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20013007522> Acesso em 04 de maio de 2022.

Zehnder, A. (1995). *Soil and Groundwater Pollution*. Kluwer Academic Publishers. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-015-8587-3> Acesso em 03 de maio de 2022.

# ANEXOS

## ANEXO I – GUIA DE COBERTURA VEGETAL

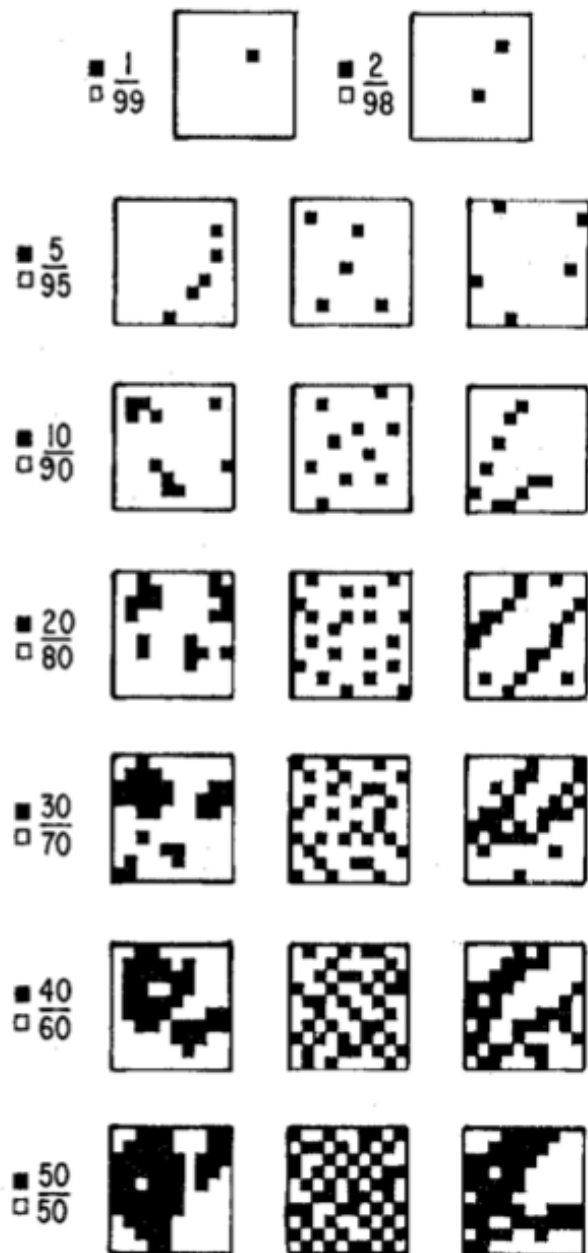


Figure 5.—Guide for estimating density of bare soil, canopy, fine roots and steps.

Fonte: Dissemeyer, 1980.