



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Efeito da temperatura nas propriedades dos solos: estudo laboratorial**

**Beatriz de Anastácio Ferreira**



**isep** Instituto Superior de Engenharia do Porto

**P. PORTO**

**2023**

(página propositadamente em branco)



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Efeito da temperatura nas propriedades dos solos: estudo  
laboratorial**

*The effect of temperature in the soil properties: laboratory study*

**Beatriz de Anastácio Ferreira**

**1160619**

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação da Doutora Maria Manuela Carvalho, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e coorientação da Doutora Maria João Fernandes, Professora Adjunta Convidada do Departamento de Engenharia Química do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

## **Júri**

### **Presidente**

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

*Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutora Teresa Maria Fernandes Valente

*Professora Associada com Agregação, Departamento de Ciências da Terra, Escola de Ciências, Universidade do Minho*

Doutora Maria Manuela Martins de Carvalho

*Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

---

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **Beatriz de Anastácio Ferreira**, em 19 de Outubro de 2023 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **16 (dezasseis) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

---

## **Agradecimentos**

São devidos agradecimentos a todas instituições e pessoas que fizeram parte do meu percurso, desde o início do meu percurso académico.

À Doutora Manuela Carvalho (DEG|ISEP), minha orientadora, quero agradecer toda a ajuda e interesse demonstrado ao longo desta dissertação. Não deixar de realçar toda a paciência e dedicação para orientar uma aluna que nunca tinha tido qualquer tipo de experiência em laboratório, sempre com imensa disponibilidade para ajudar e alegria. Muito obrigada por tudo, estou muito grata pela sua orientação; sem si, esta dissertação não era possível realizar.

À Doutora Maria João Fernandes (REQUIMTE|LAQV), minha coorientadora, quero agradecer também toda a paciência, dedicação e ajuda no laboratório e ao longo do desenvolvimento desta dissertação, pois sem a sua ajuda não teria sido possível a conclusão deste trabalho. Muito obrigada por tudo, fico super-agradecida de ter tido a oportunidade de ser guiada por si.

Ao REQUIMTE|LAQV por me ter permitido realizar o trabalho laboratorial nas suas instalações.

Ao LGMC – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP pelo apoio no tratamento das amostras e trabalho laboratorial.

Ao ICT|UM por ter realizado a análise granulométrica das amostras do estudo.

À minha família, com carinho especial à minha Mãe, ao meu Pai, ao meu namorado Martim e ao meu irmão Francisco, por me terem ajudado sempre durante o meu percurso académico.

Aos meus amigos e colegas de mestrado que sempre me ajudaram de todas as formas nesta fase.

Um grande obrigada ao Eduardo e ao João por serem muito mais do que colegas de Instituto.

(página propositadamente em branco)

## **Palavras-chave**

Solo, Temperatura, Propriedades do solo, Sustentabilidade, Geoambiente

## **Resumo**

O solo é um recurso não renovável de extrema importância para a o ser humano, desempenhando funções sociais, ambientais e produtivas. Atualmente, é altamente incentivada a aplicação de práticas de sustentabilidade relativas à gestão e manutenção do solo, procurando reduzir o impacto da sua utilização nas suas propriedades físico-químicas e biológicas. As altas temperaturas são uma das condições com impacto nas propriedades originais dos solos, podendo, até, ser responsáveis pela sua transformação. O estudo da alteração das propriedades físico-químicas do solo é importante, pois ajuda-nos a conhecer, compreender e, no futuro, prever como será o seu comportamento. Com os conhecimentos nesta temática vai ser possível criar técnicas de mitigação dos impactos nos solos, quando estes atravessarem situações adversas, como incêndios. A presente dissertação teve como objetivo principal a avaliação das alterações em propriedades físico-químicas dos solos quando estes são expostos a altas temperaturas. Foram usados dois solos com rocha-mãe distintas, nomeadamente calcário e granito, de forma que também fosse possível registar as principais diferenças entre as mesmas. Após preparação das amostras, os distintos provetes foram submetidos a três temperaturas diferentes, 350°, 500° e 650°C, para posteriormente se avaliar o impacto associado a cada temperatura aplicada. Foram realizados estudos à cor, granulometria, análise química elementar, pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, densidade aparente e capacidade de retenção de água. Nesta dissertação é apresentado um enquadramento teórico da temática em estudo, uma descrição das metodologias aplicadas laboratorialmente nos ensaios, expostos os resultados obtidos e realizada a análise dos mesmos. Os resultados obtidos revelaram alterações nas propriedades físico-químicas dos solos, tais como: diminuição do teor em matéria orgânica e aumento no pH, da condutividade elétrica e da densidade aparente com a temperatura. Destaca-se, adicionalmente, que não se verificaram variações significativas na composição elementar dos solos e a alteração da capacidade de retenção de água demonstrou comportamento variável com o tipo de solo.

(página propositadamente em branco)

**Keywords**

Soil, Temperature, Soil properties, Sustainability, Geoenvironment

**Abstract**

The soil is a vital non-renewable resource to the Earth and performs social, environmental, and productive functions. Nowadays, applying sustainability practices regarding soil management and maintenance is highly encouraged. High temperature influences and alters the original properties of soils. Studying changes in the physical and chemical properties of soils is essential because it helps us know, understand, and, in the future, predict how the soil will behave. With knowledge of this subject, it will be possible to create mitigation techniques for soils during adverse situations, such as fires. The main objective of this dissertation was to evaluate the changes in the physicochemical properties of the soils, even when they are exposed to different temperature situations. Two samples with different bedrock, a granite and limestone, were collected so that the main discrepancies between them could be registered. The samples were subjected, after their preparation, to three different temperatures, 350°, 500° e 650°C, to assess the impact associated with these temperatures. The following studies were conducted on the samples: color, granulometry, elemental chemical analysis, pH, electrical conductivity, organic matter, apparent density, and water retention capacity. This dissertation provides a theoretical framework for the subject under study, a description of the laboratory methodologies applied in the laboratory, the results obtained and their analysis. The results obtained revealed changes in the physical and chemical properties of the soils, such as: a decrease in organic matter content, an increase in pH, electrical conductivity and bulk density with temperature, no significant variations in elemental composition and variable changes in water retention capacity depending on the type of soil. Proposals for future work are also presented.

(página propositadamente em branco)

---

## Índice

1.	Introdução.....	3
2.	Revisão Bibliográfica: Breve Síntese .....	7
2.1.	Definição do conceito “solo” .....	7
2.2.	Importância dos solos como recurso – sustentabilidade.....	8
2.3.	Propriedades dos solos.....	9
2.3.1.	Cor .....	10
2.3.2.	Granulometria e Textura .....	11
2.3.3.	pH .....	13
2.3.4.	Condutividade Elétrica .....	15
2.3.5.	Matéria orgânica .....	16
2.3.6.	Densidade Aparente.....	16
2.3.7.	Capacidade de Retenção de Água.....	17
2.4.	Fatores de degradação dos solos .....	17
2.5.	Fogos e alterações climáticas .....	19
2.6.	Efeito do fogo nas propriedades dos solos .....	21
2.7.	Métodos de estudo dos impactos dos fogos nos solos.....	26
3.	Trabalho Experimental.....	29
3.1.	Introdução .....	29
3.2.	Amostragem .....	29
3.3.	Preparação das Amostras.....	31
3.4.	Cor.....	32
3.5.	Análise granulométrica.....	32
3.6.	Análise química elementar simplificada.....	33
3.7.	Determinação de pH.....	35
3.8.	Determinação da condutividade elétrica .....	36
3.9.	Determinação do teor matéria orgânica .....	36
3.10.	Determinação da densidade aparente do solo .....	38
3.11.	Determinação da capacidade de retenção de água.....	39
4.	Análise e Discussão de Resultados.....	43
4.1.	Cor.....	43
4.2.	Análise Granulométrica .....	44
4.3.	Análise Elementar Simplificada .....	49
4.4.	pH.....	53

---

4.4.1. pH em H <sub>2</sub> O .....	53
4.4.2. pH em KCl .....	54
4.5. Condutividade Elétrica.....	56
4.6. Teor de Matéria Orgânica.....	58
4.7. Densidade Aparente do Solo .....	59
4.8. Capacidade de Retenção de água.....	61
5. Conclusões .....	67
6. Referências Bibliográficas .....	73

---

## Índice de figuras

Figura 1. Incêndios rurais em Portugal continental: área ardida (ha); p - ano 2023 apenas se refere aos dados obtidos entre 1 de janeiro e 15 de setembro 2023 (ICNF, 2023). .....	3
Figura 2. Carta de Cores de Munsell utilizada para a identificação da cor dos solos. (Fonte: <a href="https://www.pantone.com.br/loja/munsell/escala-munsell-de-cores-de-solos">https://www.pantone.com.br/loja/munsell/escala-munsell-de-cores-de-solos</a> ).....	11
Figura 3. Classificação textural dos solos, segundo USDA (SSDS, 2017).....	13
Figura 4. Escala do pH (McCauley et al., 2009).....	14
Figura 5. Principais ameaças à saúde e produtividade dos solos ( <i>United Nations Convention to Combat Desertification, 2020</i> ). .....	19
Figura 6. Zonas dos locais de amostragem (adaptado do Google Earth). .....	30
Figura 7. Locais de amostragem das amostras estudadas.....	30
Figura 8. Resultado da peneiração das duas amostras com recurso a peneiros de 2 mm. ....	31
Figura 9. Várias etapas seguidas no tratamento das amostras. ....	32
Figura 10. Equipamento de bancada para a fluorescência de raios-X, Nilton™ XL3t XRF Analyser.....	33
Figura 11. Análise química elementar simplificada por fluorescência de raios-X - equipamentos utilizados na preparação das amostras. ....	33
Figura 12. Análise química elementar simplificada por fluorescência de raios-X – provetes para análise. ....	34
Figura 13. Realização das leituras por fluorescência de raios-X com o equipamento Nilton™ XL3t XRF Analyser.....	34
Figura 14. Determinação do pH. Amostras no agitador mecânico (imagem à esquerda), amostras em repouso (imagem ao centro) e medição do pH (imagem à direita). ....	35
Figura 15. Determinação da condutividade elétrica. Filtragem da amostra agitada (imagem da esquerda) e amostra filtrada preparada para medição da condutividade elétrica (imagem da direita).....	36
Figura 16. Determinação do teor em matéria orgânica. Amostras em ambiente de humidade controlada (imagem da esquerda) e amostras prontas a retirar após 4h na mufla (imagem da direita).....	38
Figura 17. Sistema utilizado para a execução do ensaio de determinação da densidade aparente do solo.....	38
Figura 18. Determinação da capacidade de retenção de água do solo. Amostras de Boelhe (imagem à esquerda). Amostras de Maxieira (amostras à direita). ....	40
Figura 19. Representação das diversas cores das amostras estudadas e sua respetiva identificação. ....	43

---

Figura 20. Frações granulométricas do solo de Boelhe (original e exposto a 350 °C, 500 °C e 600°C).	44
Figura 21. Frações granulométricas do solo da Maxieira (original e exposto a 350 °C, 500 °C e 600°C).	46
Figura 22. Triângulos de classificação textural do solo de Boelhe segundo os critérios propostos pelo USDA.	47
Figura 23. Triângulos de classificação textural do solo da Maxieira segundo os critérios propostos pelo USDA.	48
Figura 24. Principais elementos detetados no solo de Boelhe e respectivas concentrações médias determinadas por FRX no modo solo.	49
Figura 25. Principais elementos detetados no solo da Maxieira e respectivas concentrações médias determinadas por FRX no modo solo.	50
Figura 26. Concentrações médias dos elementos menores detetados no solo de Boelhe por FRX em modo solo.	52
Figura 27. Concentrações médias dos elementos menores detetados no solo da Maxieira por FRX em modo solo.	52
Figura 28. Valores médios de pH em H <sub>2</sub> O para o solo de Boelhe e respetivo desvio padrão.	53
Figura 29. Valores médios de pH em H <sub>2</sub> O para o solo da Maxieira e respetivo desvio padrão.	54
Figura 30. Valores médios de pH em KCl para o solo de Boelhe e respetivo desvio padrão.	55
Figura 31. Valores médios de pH em KCl para o solo da Maxieira e respetivo desvio padrão.	56
Figura 32. Valores médios de condutividade elétrica para o solo de Boelhe e respetivo desvio padrão.	57
Figura 33: Valores médios de condutividade elétrica para o solo da Maxieira e respetivo desvio padrão.	58
Figura 34. Valores médios obtidos para o teor de matéria orgânica para as amostras originais e as expostas à temperatura de 350°C.	59
Figura 35. Valores médios obtidos da densidade aparente para as diversas amostras do solo de Boelhe.	60
Figura 36. Valores médios obtidos da densidade aparente para as diversas amostras do solo da Maxieira.	61
Figura 37. Valores médios obtidos da capacidade de retenção de água para as diversas amostras do solo de Boelhe.	62
Figura 38. Valores médios obtidos da capacidade de retenção de água para as diversas amostras do solo da Maxieira.	63

---

---

## Índice de tabelas

Tabela 1. Propriedades físicas, químicas e biológicas a analisar em estudos geoambientais .....	10
Tabela 2. Denominação geral utilizada na descrição da textura de um solo, de acordo com o nome das suas classes texturais (Costa, 1999) .....	12
Tabela 3. Influência dos fogos em diversas características dos solos (adaptado de <i>Certini, 2005</i> ) .	24
Tabela 4. Designação dos provetes de solo utilizados no estudo laboratorial .....	32
Tabela 5. Elementos determinados na análise química por fluorescência de raios-X, modo solo ..	35
Tabela 6. Resultados da classificação relativa à propriedade cor, determinada em laboratório ....	44

---

(página propositadamente em branco)

---

### **Índice de equações**

Equação 1: Cálculo da densidade aparente. ....	16
Equação 2. Cálculo da quantidade de matéria orgânica. ....	37
Equação 3. Cálculo da densidade aparente no ensaio laboratorial. ....	39
Equação 4. Cálculo da capacidade retenção de água. ....	40

---

(página propositadamente em branco)

---

### **Índice de acrónimos ou abreviaturas**

CE – Condutividade Elétrica

CRA – Capacidade de Retenção de Água

EASAC – European Academies Science Advisory Council

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

FRX – Fluorescência de Raios-X

ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e Florestas

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

IUSS – International Union of Soil Sciences

ITPS – Intergovernmental Technical Panel on Soils

MO – Matéria Orgânica

TOC – Carbono Orgânico Total

UE – União Europeia

USDA – United States Department of Agriculture

WRB – World Reference Base for Soils Resources

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Capítulo I**

### **Introdução**

---

---

(página propositadamente em branco)

## 1. Introdução

O solo é um recurso natural de extrema importância uma vez que desempenha múltiplas funções sociais, ambientais e produtivas. É um elemento essencial no suporte da vida, na medida em que desempenha um papel crucial em numerosos serviços ecossistémicos nomeadamente no ciclo dos nutrientes, no armazenamento de minerais e no sequestro de carbono, apoiando o crescimento da cobertura vegetal e animal e o desenvolvimento de nichos necessários para a vida no planeta. Apesar da sua importância, é classificado como um recurso não renovável do ponto de vista humano devido à rápida deterioração das suas propriedades químicas, biológicas e físicas e ao facto de o seu processo de formação ser lento (Agbeshie et al., 2022; Lal R., 2015). A degradação do solo nos ecossistemas florestais é causada por vários factores, entre eles a desflorestação, os incêndios, a erosão e a contaminação (Cuesta & Giraldo, 2013; Lal R., 2015).

Nos últimos anos, a problemática dos incêndios florestais tem causado impactos adversos em diversas regiões do planeta, alterando significativamente a paisagem e deixando marcas profundas nos solos onde ocorrem (Lourenço et al., 2011). Nas regiões de clima mediterrâneo, como é o caso de Portugal, este fenómeno é recorrente (Figura 1) e têm causado mudanças significativas nos ecossistemas, aumentando o risco de erosão do solo e a desertificação (Granged et al., 2011). De acordo com dados publicados pelo ICNF, entre 1 de janeiro e 15 de setembro de 2023 arderam em Portugal um total de 33 003 hectares, dos quais 7 097 foram incêndios rurais, correspondendo a uma redução de 64% de área ardida relativamente à média anual dos 10 anos anteriores e ao 3.º valor mais baixo de área ardida, desde 2013 (ICNF, 2023); sendo, ainda, uma área relevante à escala do nosso país.

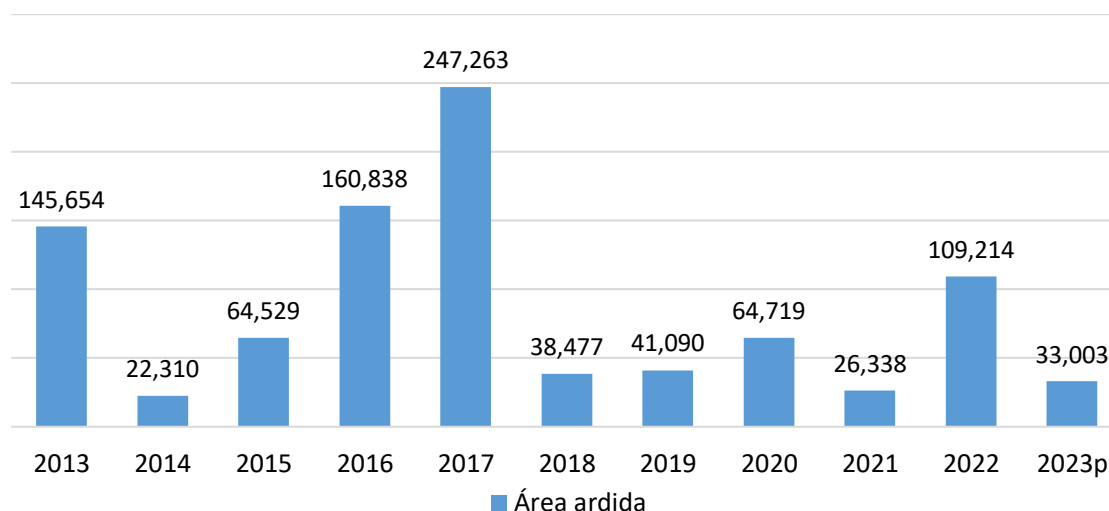


Figura 1. Incêndios rurais em Portugal continental: área ardida (ha); p - ano 2023 apenas se refere aos dados obtidos entre 1 de janeiro e 15 de setembro 2023 (ICNF, 2023).

---

Tendo em consideração que os incêndios rurais e florestais representam um problema recorrente no país, torna-se essencial a análise de alguns fatores referentes a esta problemática que atinge diversas áreas e têm impactos diretos na vida da população, nomeadamente o estudo do impacto do aumento de temperatura nas propriedades do solo.

Assim, a presente dissertação realizada no âmbito da unidade curricular “Dissertação/Estágio/Projeto” do curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, do Politécnico do Porto, com o suporte do centro de investigação REQUIMTE/LAQV e do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) do ISEP tem como principais objetivos:

- Avaliar o impacto da exposição de solos, com diferentes rocha-mãe, a distintas temperaturas;
- Avaliar a influência de diferentes temperaturas selecionadas na alteração das características físicas e químicas estudadas;
- Avaliar o impacto que as distintas temperaturas têm no solo relativamente à sua capacidade de reter água, que está conseqüentemente ligado à possibilidade de este conseguir sustentar ecossistemas.

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. O presente capítulo apresenta-se como capítulo introdutório, no qual é realizada uma primeira abordagem ao tema e à sua importância, bem como são definidos os principais objetivos do trabalho. No segundo capítulo, de revisão bibliográfica, é definido o conceito de solo e explorada a sua importância bem como as suas principais propriedades. É também apresentado um levantamento dos principais fatores de degradação dos solos destacando os incêndios e a sua relação com as alterações climáticas e aprofundando a temática no que refere aos efeitos do fogo nas propriedades dos solos e aos principais métodos de estudo utilizados para avaliar esses efeitos. No terceiro capítulo apresenta-se detalhadamente o trabalho experimental desenvolvido, nomeadamente os locais de colheita das amostras estudadas, o processo de preparação das amostras e as metodologias e materiais utilizados na sua caracterização pré e pós-preparação. No quarto capítulo, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos solos sujeitos às diferentes condições em análise, bem como uma discussão no que refere à evolução das suas propriedades em comparação com a amostra original. No quinto e último capítulo são tecidas as considerações finais, com referência às principais conclusões retiradas dos ensaios realizados e algumas sugestões para trabalhos futuros.

---

## **Capítulo II**

### **Revisão Bibliográfica: Breve Síntese**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 2. Revisão bibliográfica: breve síntese

### 2.1. Definição do conceito “solo”

A palavra “solo” é, como tantas outras, uma palavra com múltiplos significados, que estão dependentes de vários fatores tais como: o meio, o utilizador e a temática em que este se insere. De acordo com o seu significado tradicional, o solo é o meio natural para a ocorrência do crescimento de plantas, podendo possuir ou não horizontes distintos (USDA, 2018).

Segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), o solo pode ser definido como um corpo natural constituído por várias camadas compostas por matéria mineral resultante da erosão das rochas, matéria orgânica, ar e água. O solo é o resultado da influência combinada, ao longo do tempo, de fatores climáticos, topográficos e biológicos (flora, fauna e humanos) sobre os materiais originais (rocha-mãe). Assim, o solo difere da sua rocha-mãe em características como a textura, a estrutura, a consistência, a cor e propriedades químicas, físicas e biológicas (FAO, 2023). O solo é ainda definido como um corpo natural contínuo com várias dimensões espaciais e uma temporal (FAO, 2014). As suas três principais características a considerar são:

- Ser formado por constituintes minerais e orgânicos, incluindo sólidos, líquidos e/ou gasosos.
- Ter os seus constituintes organizados estruturalmente, apresentando estruturas específicas do meio pedológico. Estas estruturas formam o aspeto morfológico do solo e são o resultado da história do solo, da sua dinâmica e propriedades reais. O estudo das estruturas do solo ajuda na perceção das suas propriedades físicas, químicas e biológicas, permite-nos entender a relação entre o passado e o presente e prever, de certa forma, o futuro.
- O solo está em evolução constante, o que lhe confere uma dimensão temporal.

A *World Reference Base for Soils Resources* (WRB) no ano de 2006, adotou uma abordagem para nomear o que é constituinte da “epiderme” da Terra, sendo: “qualquer material na superfície da Terra, até uma profundidade de 2 m, que esteja em contacto com a atmosfera, excluindo organismos vivos, áreas com gelo contínuo não cobertas por outros materiais, areias instáveis e corpos de água com mais de 2 m de profundidade”. Há, no entanto, alguns argumentos que questionam este tipo de definição de solo, onde se condiciona a sua existência a uma profundidade específica. Estas abordagens menos limitativas e não tão regradas têm diversas vantagens, nomeadamente na resolução de problemas ambientais, pois estes são abordados de forma sistemática e abrangente, evitando que haja uma discussão desnecessária sobre a definição aceite universalmente de solo, sua espessura necessária e a sua estabilidade. A definição anterior inclui rocha contínua, solos urbanos pavimentados, solos em áreas industriais, solos em grutas, assim como solos subaquáticos. Solos sob rocha contínua, exceto aqueles que estão presentes em grutas

---

que, geralmente, não são considerados nesta classificação. No entanto, em certos casos, o WRB pode ser aplicado para classificar solos sob rocha, como, por exemplo, em reconstrução de paleoambientes (WRB - IUSS, 2014).

Como podemos perceber, o conceito de “solo” é variado e abrangente. Ainda assim, é um dos materiais mais importantes da Terra, sendo que todos os organismos são dele dependentes diariamente (Channarayappa & Biradar, 2018).

## **2.2. Importância dos solos como recurso – sustentabilidade**

O solo é um recurso natural de incomensurável importância devido ao facto de, para além de disponibilizar nutrientes às plantas para serem sintetizados os alimentos, fornecem vários serviços de ecossistema que são cruciais para a existência de vida na Terra (Montanarella et al., 2015).

Nas sociedades atuais, o solo é utilizado diariamente para armazenamento de resíduos sólidos, para filtrar águas residuais e como fundação para grandes centros urbanos e cidades, independentemente do seu tamanho. Tudo assenta, literalmente, sob o solo. Este é a base de qualquer agroecossistema existente, que nos fornece recursos básicos e essenciais, tais como alimentos, fibras, madeira e até mesmo combustível (Channarayappa & Biradar, 2018).

Do exposto, percebemos que o solo tem ligação a tudo e que a gestão dos seus nutrientes e a conservação da sua estrutura e biologia são essenciais para a preservação das paisagens e da saúde dos solos destinados à produção de alimentos (Channarayappa & Biradar, 2018).

Foi criada uma proposta de uma Diretiva, pelo Parlamento Europeu e do Conselho, sobre a monitorização e resiliência dos solos (Lei da Monitorização dos Solos) onde é referido que existem evidências científicas que indicam que cerca de 60% a 70% dos solos da União Europeia (UE) são considerados atualmente como não saudáveis. A aplicação de práticas de gestão sustentável irá assegurar aos países membros que os solos tenham a capacidade de suportar os diversos serviços dos ecossistemas, tanto vitais para os humanos como para o ambiente. Deverão melhorar a segurança, a saúde e a infraestrutura das comunidades e sustentar os meios de subsistência das áreas circundantes (Directive of The European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law), 2023).

A diretiva proposta pelo Parlamento Europeu define uma estrutura para que seja possível aos gestores de solos praticar uma gestão sustentável dos solos e para que este recurso demonstre os benefícios de ser gerido desta forma (Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law), 2023).

---

Há um grande consenso entre as várias organizações mundiais sob a necessidade de garantir a sustentabilidade dos solos e o Painel Técnico Intergovernamental dos Solos (ITPS - *Intergovernmental Technical Panel on Soils*) disponibilizou diversos critérios úteis para determinar se em dada área os solos têm funcionamento adequado e se estes estão a ser geridos de maneira sustentável. Os critérios são os seguintes (EASAC, 2018):

- A perda de nutrientes é baixa;
- A produção biológica é superior relativamente aos limites potenciais estabelecidos pelo clima e disponibilidade de água;
- Os níveis de biodiversidade do solo e acima deste estão relativamente altos;
- A chuva é eficazmente capturada e mantida na zona das raízes;
- As taxas de erosão e deposição dos solos são baixas, com pequenas quantidades a serem transferidas do sistema;
- Não são introduzidos contaminantes no solo e os contaminantes existentes não apresentam concentrações preocupantes, capazes de causar danos;
- Os sistemas de produção de alimentos e fibras destinados ao consumo humano não estão dependentes de significativas entradas líquidas de energia;
- A emissão líquida de gases de efeito estufa é zero ou negativa (no caso de o solo sequestrar carbono).

Segundo a *European Academies Science Advisory Council* (EASAC), os critérios apresentados deveriam estar na base de uma revisão das políticas determinadas para a UE. Deveriam ser executadas medições e monitorização entre os vários países pertencentes e estabelecer, conforme o local, valores indicativos que melhor permitam a determinação do estado do solo de um local, se está ou não a caminho de se tornar sustentável (EASAC, 2018).

### **2.3. Propriedades dos solos**

No âmbito dos estudos geoambientais é necessário analisar algumas das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos. Na Tabela 1 é apresentada uma síntese com algumas dessas propriedades.

Nesta dissertação foram analisadas algumas das propriedades referidas, como: a cor, a granulometria, o pH, a condutividade elétrica (CE), a presença de matéria orgânica (MO), a densidade aparente e a capacidade de retenção de água.

Tabela 1. Propriedades físicas, químicas e biológicas a analisar em estudos geoambientais

Propriedades Físico-químicas		Propriedades Biológicas
Granulometria e textura	Capacidade de retenção de água Condutividade Elétrica (CE) pH Densidade Aparente Carbono Orgânico Total (TOC)	Microbiologia do solo
Estrutura		
Cor		
Composição Mineralógica		
Teor em água		
Potencial Oxidação-redução ( <i>redox</i> )		
Matéria Orgânica		

### 2.3.1. Cor

A cor do solo é determinada pela composição mineral, concentração de elementos, matéria orgânica e humidade sendo, muitas vezes, uma das suas propriedades mais significativas. É reveladora das propriedades do solo e dos processos envolvidos na sua criação (Zhang et al., 2023). O facto de a cor à superfície ser diferente da do material original é, normalmente, resultado dos processos de formação e manutenção do solo, o que indica também a existência de outros processos tais como, excessos de salinidade ou a erosão. A cor apresenta grande importância pelo seu papel definitivo na classificação dos solos (Shields et al., 1996).

A cor é uma característica que permite, de forma expedita e a olho nu, diferenciar vários solos, sendo possível correlacioná-la com os seus processos de formação, níveis de matéria orgânica, tipos de óxidos de ferro, entre outros. Dada a importância desta propriedade e de forma a identificar a cor do solo de forma rigorosa e reproduzível, é utilizado um padrão internacional, denominado como a Carta de Cores de Munsell (Figura 2), que considera a variação de cor em escalas de três componentes: Matiz, Valor e Cromo (SBCS, 2018). Matiz é a cor espectral dominante, Valor é a luminosidade da cor e Cromo é a pureza da cor (Guimarães, 2016).



Figura 2. Carta de Cores de Munsell utilizada para a identificação da cor dos solos. (Fonte: <https://www.pantone.com.br/loja/munsell/escala-munsell-de-cores-de-solos>).

### 2.3.2. Granulometria e Textura

A análise granulométrica tem como objetivo determinar a dimensão das partículas constituintes dos solos, bem como a sua distribuição ponderal; sendo a sua composição granulométrica uma propriedade física representada pela proporção relativa entre as classes de tamanho das partículas presentes no solo.

A textura do solo é um atributo físico de elevada importância uma vez que influencia diretamente a sua capacidade de reter e/ou drenar água, fornecer nutrientes às plantas e suportar a vida microbiana. A sua determinação e classificação está associada às proporções relativas de areia, siltes e argilas no solo (Foster et al., 2013; Nemes, 2023). A textura é a propriedade física do solo menos suscetível a alterações ao longo do tempo, embora condições extremas de erosão (após inundações ou temperaturas bastante elevadas provocadas por incêndios) possam causar alterações na mesma (Porta Casanellas et al., 2003).

De acordo com o United States Department of Agriculture (USDA), os principais grupos de solos são: as areias, as siltes e as argilas. Cada um destes grupos contém classes texturais mais específicas que nos fornecem uma ideia precisa relativa à distribuição do tamanho das partículas constituintes e da natureza geral das propriedades físicas do solo. As classes texturais definidas estão presentes na

Tabela 2, onde podemos observar a existência de uma redução gradual da granulometria, desde arenosa (textura mais grosseira) até argilosa (textura muito fina). Nas classes arenosa e areia franca é usual existir um predomínio relativo das propriedades da areia, visto que a fração areia presente

é usualmente 70% do peso do material, enquanto a fração de argila é apenas 15%. Ainda assim, a maioria dos solos está em algum tipo de franco (Reinert & Reichert, 2006).

Tabela 2. Denominação geral utilizada na descrição da textura de um solo, de acordo com o nome das suas classes texturais (Costa, 1999)

<b>Termos Gerais</b>		<b>Classe Textural</b>
Nomes Comuns	Textura	
Solos Arenosos	Grosseira	Arenosa
		Areia franca
Solos Siltosos	Moderadamente grosseira	Franco arenosa
		Franca
	Média	Franco siltosa
		Siltosa
	Moderadamente fina	Franco argilo-arenosa
		Franco argilo-siltosa
Franco argilosa		
Solos Argilosos	Fina	Argilosa arenosa
		Argilosa siltosa
		Argilosa

Na maior parte dos casos, os solos são majoritariamente constituídos por partículas com dimensões menores que 2 mm. Sendo assim e desconsiderando a existência de matéria orgânica e de partículas com dimensões superiores a 2 mm, foram criados gráficos que servem como sistema de classificação para a definição do tipo de textura dos solos, de forma a tornar o sistema de classificação o mais funcional possível. Estes sistemas gráficos de classificação baseiam-se nas percentagens de areia, silte e argila presentes nos solos, assim como o desenvolvido pela USDA que se encontra apresentado na Figura 3. O sistema da USDA assenta na sobreposição de três triângulos isósceles que representam a quantidade de argila, silte e areia no solo em estudo (Reinert & Reichert, 2006).

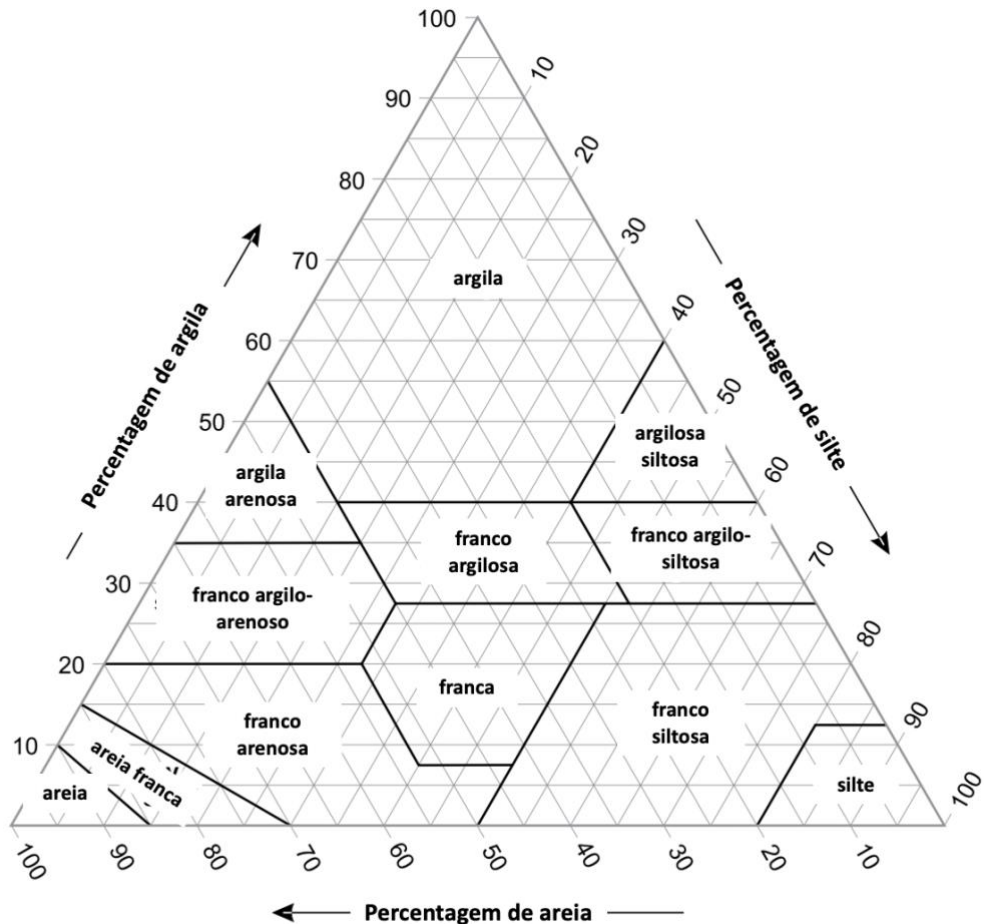


Figura 3. Classificação textural dos solos, segundo USDA (SSDS, 2017).

### 2.3.3. pH

O pH é uma propriedade usualmente determinada no estudo de solos, pois todas as reações químicas e bioquímicas são influenciadas pela atividade do próton ( $H^+$ ), que é medido pelo pH do solo (Goleman et al., 2004). O pH fornece-nos muito mais informações do que se o solo é ácido ou básico, este pode dar-nos indicação da existência de nutrientes essenciais e a toxicidade de alguns elementos pode ser estimada devido à sua relação conhecida com os diferentes valores de pH (Mattigod & Zachara, 1996).

O pH é definido por uma função logarítmica, que é o negativo do algoritmo da concentração do cátion de hidrogénio ( $pH = -\log[H^+]$ ), por este facto, cada unidade na escala do pH é dez vezes menos ácida do que a precedente. Isto é, uma solução com  $pH = 7$  tem dez vezes maior concentração de iões  $H^+$  do que uma solução com  $pH = 8$  e cem vezes mais do que uma com  $pH = 9$  (McCauley et al., 2009). Os solos são definidos como sendo ácidos, neutros ou alcalinos (básicos), denominação esta que depende do seu valor de pH que pode variar entre o 0 e o 14 (à temperatura de  $25^\circ C$ ), como

se pode verificar na Figura 4. Segundo esta escala, designada como escala de Sorensen, considera-se que um pH é neutro quando é igual a 7, se for menor que 7 é ácido e se for maior que 7 é alcalino.

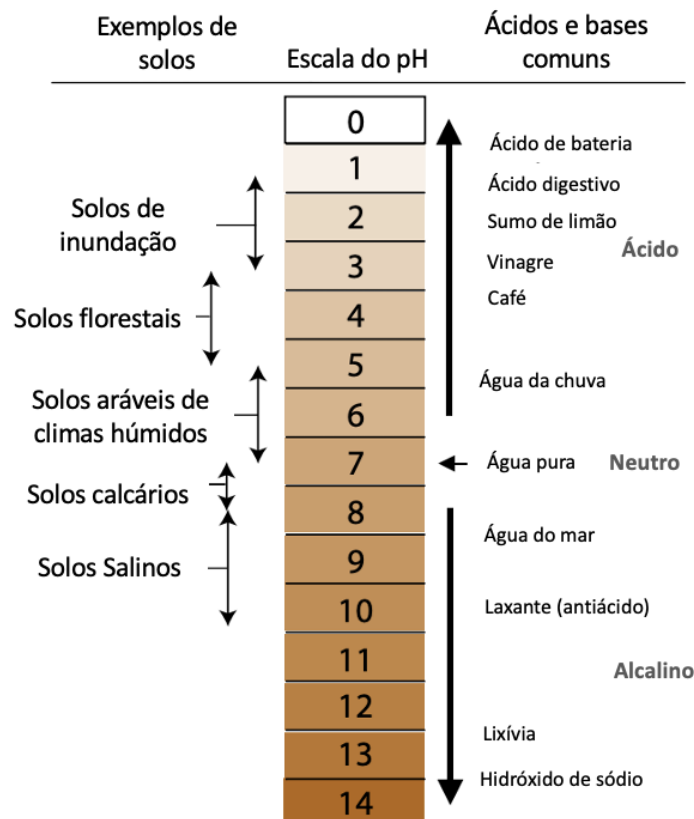


Figura 4. Escala do pH (McCauley et al., 2009).

No âmbito dos estudos geoambientais, a determinação do pH pode ser executada segundo diversos métodos, conforme as necessidades e objetivos do estudo. O método mais usual para a medição do pH é em solução aquosa, ainda assim existem outros métodos com recurso a diversas soluções eletrolíticas utilizadas em estudos de solos para fins específicos (SSDS, 2017). Não é fácil executar uma medição precisa e consistente do pH do solo, pois existem diversos fatores que podem ter influência na sua determinação. A utilização de uma solução salina de cloreto de potássio 1 M (KCl) ou de cloreto de cálcio 0,01M ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é um método usualmente utilizado para reduzir o possível “efeito do sal” sentido na determinação do pH em água, minimizando as interferências causadas pelos iões presentes em solução, principalmente quando se pretende a determinação do pH em solos arenosos ou em solos que apresentam capacidade de realizar trocas catiónicas relativamente baixas (Jones, 2001). Na maioria dos solos naturais, os valores de pH em  $\text{CaCl}_2$  variam entre 3 (muito ácido) e 8 (pouco alcalino) (Margesin & Schinner, 2005). O pH do solo pode também ser determinado utilizando corantes químicos, ainda que, a aplicação de um medidor de pH

---

equipado com um eletrodo de vidro e célula de referência seja o procedimento mais usual para efetuar essa medição (Jones, 2001).

O pH dos solos é uma propriedade que é influenciada por ácidos e por íons formadores de base nos solos. Os cátions formadores de ácidos são: o hidrogênio ( $H^+$ ), o alumínio ( $Al^{3+}$ ) e o ferro ( $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$ ) e os cátions de base comuns abrangem: o cálcio ( $Ca^{2+}$ ), o magnésio ( $Mg^{2+}$ ), o potássio ( $K^+$ ) e o sódio ( $Na^+$ ) (McCauley et al., 2009).

No caso de estar a ser determinado no estudo de um solo, o pH permite a avaliação de características importantes. Os valores do pH em água podem, por exemplo, ser utilizados na previsão dos cátions dominantes nas trocas ocorridas no solo no momento de amostragem e análise, com relativa precisão.

#### 2.3.4. Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica (CE) é uma propriedade do solo indicativa da sua qualidade, é influenciada pelo total de íons presentes na solução. Estes íons podem ser aniões ( $NO_3^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^-$ ,  $OH^-$ ) ou cátions ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $H^+$ ), suspensos na solução de solo. Esta propriedade é usualmente associada ao estudo da salinidade do solo, ainda assim, também pode ser utilizada como medida de outros constituintes solúveis (Smith & Doran, 2015).

A condutividade elétrica é uma medida da capacidade de um material conduzir/transmitir carga elétrica, é uma propriedade inerente do material. No caso dos solos, esta propriedade está muito relacionada com o tamanho das partículas e a sua textura (Williams & Hoey, 1987). Assim, verifica-se que a tendência é as areias apresentarem valores de CE baixos (0 a 5 mS/m), os siltes apresentarem CE média (5 a 35 mS/m) e as argilas CE alta (10 a 1000 mS/m) (Lund et al., 1972).

Para além de conseguir identificar situações onde as texturas dos solos variam e determinar a salinidade destes, a CE também apresenta relação com outras propriedades do solo que podem afetar a sua qualidade como, por exemplo:

- **Matéria Orgânica:** o carbono orgânico acumula-se em zonas de solos pouco drenados e com maiores teores de argila (Jaynes et al., 1995).
- **Capacidade de retenção ou drenagem de água:** zonas secas ou com humidade em excesso apresentam, usualmente, texturas diferentes. Estas diferenças podem ser detetadas utilizando a condutividade elétrica (Jaynes, 1996).
- **Profundidade de camadas de argila:** é possível através da variação da condutividade elétrica prever, com precisão, a que profundidade se encontra uma camada de argila (Jaynes, 1996).

---

### 2.3.5. Matéria orgânica

A componente orgânica presente num solo chega, em alguns casos, a atingir valores de 30% da massa total do solo. Designa-se por matéria orgânica (MO) qualquer material produzido originalmente por organismos vivos, quer animais quer plantas, que está de volta ao solo e é submetido a processos de decomposição. Esta consiste numa variedade de materiais, tais como, misturas de materiais em estado de decomposição avançado (húmus) e tecidos originais intactos das plantas e animais (Bot & Benites, 2005). Para falar sobre MO é essencial definir o termo decomposição, que assenta na quebra física e no processo biológico da transformação bioquímica das moléculas orgânicas complexas em moléculas orgânicas e inorgânicas mais simples, de material morto (Juma, 2001).

A quantidade total e a partição da MO no solo são afetadas pelas propriedades do solo e pela quantidade anual de resíduos vegetais e animais no ecossistema. Ou seja, propriedades do solo como a textura, o pH, a temperatura, a humidade, a aeração, a mineralogia e atividades biológicas vão impactar a taxa de decomposição e acumulação de MO no ecossistema. Por outro lado, a MO também influencia e modifica muitas das propriedades do solo, nomeadamente a sua capacidade de fornecer azoto (N), fósforo (P), enxofre (S) e metais pesados e a sua permeabilidade e capacidade de retenção de água. Também a capacidade de troca catiónica, a cor, o grau de agregação, a estrutura e a temperatura do solo poderão ser afetadas pela MO presente (Bot & Benites, 2005; Mattigod & Zachara, 1996).

### 2.3.6. Densidade Aparente

A densidade aparente dos solos, também conhecida como massa volúmica ( $\rho$ ), é a razão entre a massa dos constituintes do solo [partículas ( $W_s$ ) e água ( $W_w$ )] e o volume total de solo ( $V_t$ ), tal como está indicado na Equação 1, que é expressa em  $\text{kN/m}^3$  (Lal & Shukla, 2004).

$$\rho = \frac{W_s + W_w}{V_t}$$

Equação 1: Cálculo da densidade aparente.

A densidade aparente é um indicador relativo à compacidade do solo. Este afeta a infiltração, a profundidade atingida pelas raízes, capacidade de água disponível, porosidade e aeração do solo, disponibilidade de nutrientes para uso vegetal e atividade dos microrganismos presentes no solo, todos estes fatores-chave nos processos e produtividade dos solos (USDA, 2019).

---

É uma propriedade que está dependente, inerentemente, da textura do solo, da densidade dos minerais presentes no mesmo e da existência de partículas de matéria orgânica, assim como, da distribuição espacial de cada um destes (USDA, 2008).

Solos soltos, bem agregados e porosos, e solos com teor em matéria orgânica alto, normalmente, apresentam densidade aparente mais baixa. Os solos arenosos apresentam valores de densidade aparente geralmente altos, uma vez que têm menos vazios que solos siltosos e argilosos. A densidade aparente geralmente aumenta com a profundidade, isto porque as camadas mais profundas são, normalmente, mais compactadas, com menos vazios e com menos matéria orgânica, apresentam agregados menos estáveis e menor penetração de raízes do que as camadas mais superficiais (USDA, 2019).

### 2.3.7. Capacidade de Retenção de Água

A capacidade de retenção de água (CRA) de um solo é relativa à capacidade que solo possui de armazenar água, com base na relação entre a absorção e a humidade volumétrica. Esta propriedade permite-nos observar o eventual comportamento de um solo não saturado quando este é submetido a um processo de absorção de água, ou seja, quando temos um solo completamente seco como é que este se comporta quando exposto a uma quantidade de água estipulada. Existem vários fatores que influenciam positivamente e/ou negativamente a CRA de um solo, nomeadamente: a estrutura, a textura, a mineralogia do solo (Karen da Costa da Silveira et al., n.d.) e quantidade de matéria orgânica (Govindasamy et al., 2023).

A CRA do solo é utilizada como um importante indicador da possível capacidade desse solo suportar ou não o crescimento de plantas e de atividade microbiana. Os solos com partículas mais finas e maior quantidade de MO terão CRA superior a solos que sejam mais grosseiros e mais pobres em MO (Govindasamy et al., 2023).

## 2.4. Fatores de degradação dos solos

Os fatores de degradação dos solos são referentes aos diversos processos e atividades que podem levar à ou degradação da qualidade e saúde do solo. A degradação dos solos é, atualmente, uma questão ambiental significativa que pode ter impactos negativos na agricultura, nos ecossistemas e na sustentabilidade da Terra, em geral. São vários os processos associados a esta temática. De acordo com a *United Nations Convention to Combat Desertification* os principais fatores de degradação dos solos são:

- **Erosão:** ocorre quando o solo é removido e transportado pelo vento, água ou outros agentes naturais (Beek & Tóth, 2012). Pode ser resultado de ações como o desmatamento, más práticas de gestão de terrenos e chuvas intensas. Da erosão dos solos resulta redução da sua fertilidade,

---

também afeta a qualidade da água e pode levar à sua sedimentação em locais submersos, como lagos, rios, oceanos e entre outros (Montanarella, 2010). Segundo a Agência Europeia do Ambiente, 16% do terreno europeu está exposto e é vítima de erosão pelo vento e pela chuva, o que é uma ameaça para terrenos que são necessários para pasto e agricultura, por exemplo (EASAC, 2018).

- **Salinização:** este processo ocorre quando a concentração de sais no solo aumenta e alcança níveis que são prejudiciais ao crescimento das plantas. Por vezes, em zonas mais áridas, a irrigação das mesmas pode levar à acumulação de sais no solo à medida que a água evapora (Montanarella et al., 2015).
- **Compactação:** é o processo de compressão do solo que leva à redução da sua porosidade e ao aumento da sua densidade. Pode ser resultante de passagem de maquinaria pesada, presença de gado entre outras atividades. A compactação podem dificultar a infiltração de água e, por consequência, o crescimento das raízes (Montanarella et al., 2015).
- **Degradação química:** inclui processos como a acidificação e poluição. As chuvas ácidas e a aplicação excessiva de fertilizantes, por exemplo, podem gerar a acidificação do solo, o que altera o pH do mesmo e a disponibilidade de nutrientes. A contaminação por poluentes gerados ou não nas indústrias e o descarte inadequado de resíduos também levam à degradação da qualidade do solo (Montanarella et al., 2015).
- **Perda de matéria orgânica:** a matéria orgânica desempenha um papel fulcral na manutenção das estruturas dos solos, no ciclo dos nutrientes e na retenção da água. Más práticas de gestão de solos, como, por exemplo, o pastejo excessivo, desmatamento e o cultivo inadequado podem dar origem a um declínio no conteúdo de matéria orgânica presente no solo (USDA, 2008).
- **Sobrepastoreio:** processo que ocorre, como o próprio nome indica, quando o gado pasta excessivamente numa determinada área de terra, o que pode levar à remoção da cobertura vegetal, à compactação dos solos e à redução do crescimento das plantas, podendo resultar na erosão e degradação do solo (Montanarella et al., 2015).
- **Desflorestação:** a remoção de árvores e coberto vegetal de uma zona pode expor o respetivo solo a erosão. As árvores também contribuem para a estabilização do solo e prevenção da erosão (Montanarella et al., 2015).
- **Perda da biodiversidade:** a existência de biodiversidade no solo é essencial para a manutenção dos ecossistemas de solo saudáveis. Existem algumas atividades que podem perturbar o equilíbrio natural dos organismos do solo e podem originar a sua degradação, tais como a aplicação excessiva de pesticidas e a monocultura (Montanarella et al., 2015).

- **Urbanização:** o crescente desenvolvimento urbano pode resultar na impermeabilização do solo devido à sua cobertura por superfícies impermeáveis como asfalto e alcatrão. A aplicação destas superfícies reduz a infiltração de água, o que resulta no aumento do escoamento superficial e na diminuição da qualidade do solo (Montanarella et al., 2015).
- **Alterações climáticas:** alterações no padrão das temperaturas e precipitações podem ter influência nos processos de degradação dos solos. O aumento das temperaturas pode levar à aceleração da decomposição da matéria orgânica e a alteração dos padrões de precipitação pode impactar na erosão e na disponibilidade de água (Montanarella et al., 2015).

A Figura 5 foi apresentada na Convenção de Combate à Desertificação das Nações Unidas e sintetiza as principais ameaças e processos associados à degradação dos solos.

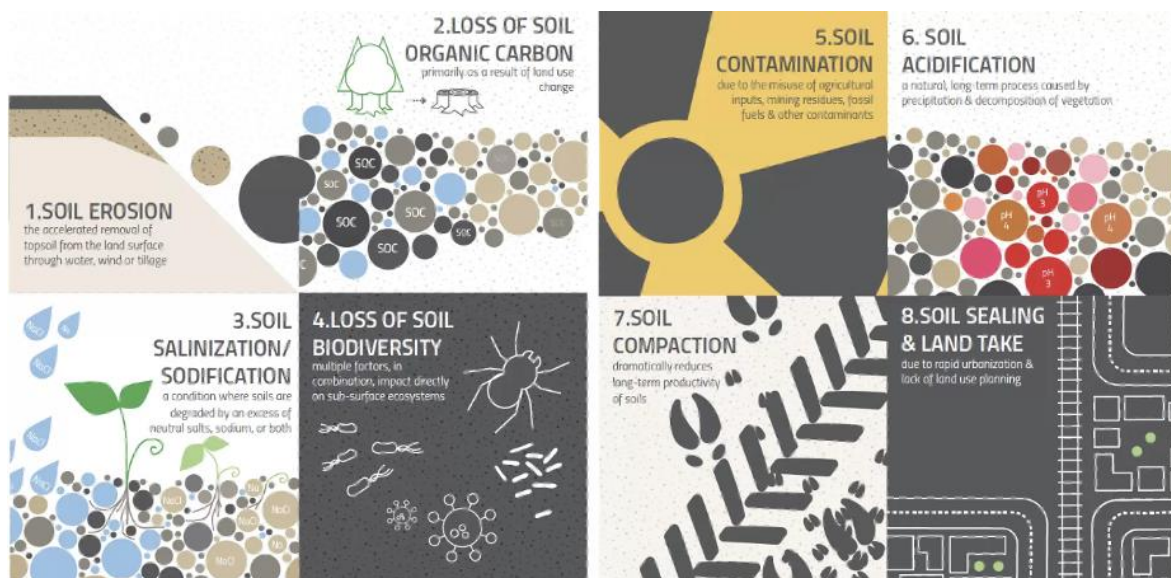


Figura 5. Principais ameaças à saúde e produtividade dos solos (*United Nations Convention to Combat Desertification, 2020*).

Para mitigar a degradação do solo, deverão ser adotadas e incentivadas práticas sustentáveis da gestão dos solos, incluindo nestas medidas de controlo da erosão, técnicas de irrigação adequadas, florestação, rotação de culturas e agricultura biológica. A implementação destas práticas é essencial para proteger e melhorar a saúde do solo e para garantir a produtividade e a capacidade de recuperação dos nossos ecossistemas a longo prazo.

## 2.5. Fogos e alterações climáticas

Verifica-se a existência de uma forte relação entre a ocorrência de fogos e as alterações climáticas, uma vez que as alterações climáticas apresentam um peso significativo na frequência, intensidade e comportamento dos incêndios florestais em todo o globo. Apresentam-se, de seguida, alguns dos

---

fatores associados às alterações climáticas capazes de promover o aumento da intensidade e severidade dos incêndios:

- **Aumento da temperatura:** um dos principais impactos das alterações climáticas é o aumento das temperaturas do planeta Terra. Este aumento de temperatura pode resultar em condições mais secas, especialmente em regiões mais propícias ao acontecimento de fogos. A vegetação seca torna-se mais suscetível à ignição e em combinação com ventos forte, acelera a propagação do incêndio (Calvin et al., 2023).
- **Condições de seca:** estas condições são agravadas pelas alterações climáticas em muitas regiões. O teor de humidade dos solos é reduzido, a vegetação seca e aumenta a probabilidade dos fogos florestais. Grandes períodos de seca podem gerar condições semelhantes às de uma zona mais propícia ao acontecimento de um incêndio, que facilitam a origem e a propagação do mesmo (Calvin et al., 2023)
- **Aumento do stress da vegetação:** as temperaturas superiores e o stress hídrico podem gerar o enfraquecimento das plantas, o que as pode tornar mais suscetíveis a doenças e infestações por parasitas e/ou insetos. A morte da vegetação acaba por operar como fonte de combustível adicional para fogos, sendo, por este motivo, aconselhado o desbaste e limpeza de terrenos permitindo a redução da ocorrência de zonas com estas características (Calvin et al., 2023)
- **Precipitação-padrão alterado:** as alterações climáticas podem ter influência nos padrões de precipitação, registando-se em algumas regiões eventos de precipitação mais intensos e em outras períodos de seca mais prolongados que o habitual. Ambas as situações podem contribuir para o aumento do risco de fogo. As chuvas fortes podem causar o rápido crescimento da vegetação que futuramente poderá ser combustível para incêndios e períodos de seca prolongados criam condições perfeitas para a ignição (Calvin et al., 2023).
- **Temporadas de fogos prolongadas:** O aumento das temperaturas globais pode resultar em períodos de incêndios mais longos em muitas regiões do globo. Os fogos que normalmente ocorriam durante um determinado período podem ter, atualmente, uma maior janela temporal de ocorrência, para inflamarem e se espalharem (Calvin et al., 2023).
- **Ciclos de *feedback*:** durante os fogos florestais são libertadas grandes quantidade de CO<sub>2</sub> e outros gases de efeitos estufa para a atmosfera. Estas emissões contribuem também para o aquecimento global e posteriores alterações climáticas, criando assim um ciclo de *feedback*. Conforme as alterações climáticas prosseguem ocorre um aumento da probabilidade de incêndios florestais mais frequentes e intensos, levando a mais emissões de gases com efeito de estufa que favorecem as alterações climáticas (Calvin et al., 2023)

- 
- **Descongelamento do *permafrost*:** nas zonas mais frias do globo, o solo encontra-se permanentemente congelado (*permafrost*) e contém quantidades grandes de carbono orgânico; à medida que este derrete, devido ao aumento das temperaturas, pode ocorrer a libertação deste carbono para o meio ambiente. A libertação deste material orgânico pode contribuir para a maior ocorrência de fogos, como combustível (IPCC, n.d.).
  - **Alterações dos padrões do vento:** o vento é um dos grandes fatores responsáveis pela propagação de fogos e as alterações climáticas têm influência nos padrões do vento, podendo alterar a sua direção e a sua velocidade. Quanto mais fortes os ventos, maiores serão as distâncias a que estes podem transportar fagulhas, que potencialmente podem originar novos incêndios (Calvin et al., 2023).
  - **Impactos nos ecossistemas:** incêndios florestais intensos e frequentes podem alterar os ecossistemas, o que pode alterar o tipo de vegetação e as propriedades do solo. Isto pode afetar o armazenamento de carbono e a capacidade de os ecossistemas atuarem como armazenadores de carbono (Calvin et al., 2023).

A discussão relativa à relação entre os incêndios e as alterações climáticas requer que seja executada uma abordagem multifacetada. É essencial que sejam executadas medidas para a mitigação das alterações climáticas através da redução das emissões dos gases de efeito estufa para a nossa atmosfera. Também deverão ser aplicadas melhores estratégias para a gestão de incêndios, incluindo fogos prescritos, sistemas de alerta precoce e preparação das comunidades pois estas podem ajudar a reduzir o impacto causado por este tipo de eventos naturais, tanto no quotidiano das pessoas como nos ecossistemas. Sendo assim, é essencial reconhecer as complexas interações entre estes dois fatores para existir o correto desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão e adaptação ao terreno em mudança devido aos fogos num planeta em aquecimento crescente (Calvin et al., 2023).

## **2.6. Efeito do fogo nas propriedades dos solos**

Os incêndios são geralmente o maior fator responsável pelas alterações e renovações florestais, que por sua vez influenciam e podem, até mesmo, modificar ecossistemas. Os efeitos do fogo e consequente aumento da temperatura nos solos estão associados à sua severidade, que por sua vez é influenciada por uma série de fatores ambientais. A severidade dos fogos depende da sua intensidade e do tempo de contacto; sendo a intensidade proporcional à energia térmica e o tempo de contacto a sua duração. O tempo de contacto é um dos componentes da severidade do fogo que mais peso tem nas alterações abaixo da superfície. Os fogos florestais geralmente ocorrem na presença de quantidade abundante de combustível seco e são mais severos que os fogos prescritos (Certini, 2005).

---

As propriedades dos solos podem ser alvo de mudanças induzidas pelo fogo a curto, médio e a longo prazo, podendo representar alterações de caráter permanente. Estão dependentes de fatores como: tipo de região, severidade e frequência dos incêndios e condições pré-fogo. A textura é uma das características que pode sofrer alteração pela ação do fogo apresentando-se, geralmente, mais fina após a sua ocorrência devido ao aumento da fração siltosa, que resulta da decomposição de areias constituídos por minerais caulinizados (Verma & Jayakumar, 2012). A fração com maior sensibilidade ao aumento da temperatura é a argila, pois começa a sua alteração aos 400°C quando a hidratação e estrutura entram em decadência. A destruição total da argila pode ocorrer quando são atingidas temperaturas entre os 700°C e 800°C (De Bano et al., 2005).

Relativamente à estrutura dos solos esta é influenciada pela quantidade e tipo de argila existente, pela presença de catiões, pelas forças de atração e coesão entre os componentes de agregados, a atividade microbiana, óxidos de ferro e alumínio e a MO. A combustão de MO é um dos fatores principais na destruição dos agregados. Existem certas propriedades que podem aumentar a estabilidade de um terreno, quando submetidas a certas temperaturas. Por exemplo, no caso de ocorrerem incêndios de baixa intensidade, que não alteram drasticamente a estrutura do solo, pode até mesmo acontecer um aumento da estabilidade deste, podendo estar associado ao aumento da capacidade de o solo repelir água pós-incêndio e/ou ao preenchimento de vazios por cinzas. No caso de as temperaturas atingirem os 500°C pode ocorrer a recristalização dos hidróxidos de ferro e alumínio o que resulta numa maior agregação do solo (Mataix-solera et al., 2011).

A permeabilidade e a massa volúmica aparente apresentam uma relação direta com a porosidade do solo. Geralmente, após a ocorrência de fogos, verifica-se a diminuição da porosidade e da permeabilidade do solo devido à transformação dos agregados e à presença de cinzas e argilas que preenchem os vazios existentes. Como consequência deste fenómeno ocorre diminuição da capacidade da água penetrar no solo, causando assim aumento do escoamento superficial e da erosão (Cerdà & Doerr, 2008; Martin & Moody, 2001).

A CE dos solos expostos a fogos aumenta temporariamente, devido à libertação de iões inorgânicos que resultam da combustão de MO (Ciampa et al., 2009; Granged et al., 2011; Pereira et al., 2017). Ainda assim, estas variações de condutividade elétrica já não se revelam significativas após 5 meses, comparativamente a valores anteriores ao fogo pois ocorre lixiviação do solo e os nutrientes presentes são absorvidos pela vegetação, fazendo com que os valores da CE voltem aos inicialmente obtidos (Pereira et al., 2017).

Outra característica dos solos que é alvo de alteração é a cor, o que acontece usualmente quando existe o fenómeno da combustão. Ocorre avermelhamento da cor do solo devido às temperaturas elevadas tornarem possível a transformação dos óxidos de ferros e remoção completa da MO (Ulery

---

& Graham, 1993). Temperaturas altas (cerca de 600°C) apenas tornam o solo mais avermelhado após 45 minutos de contacto. Assim, conforme as temperaturas diminuem no aquecimento a curto prazo (300°C a 600°C) os solos tendem a ficar mais amarelados (Ketterings & Bigham, 2000). A temperaturas baixas a moderadas o solo acaba coberto por uma fina camada de cinzas, de cor negra ou cinzenta. Em solos queimados severamente a camada que jaz abaixo da superfície, 1 a 15 cm de profundidade, encontra-se escurecida (Ulery & Graham, 1993).

O pH dos solos aumenta consoante o aquecimento do solo como resultado da destruição de ácidos orgânicos. Ainda assim, só ocorrem crescimentos significativos quando estes solos são expostos a temperaturas altas (superiores a 450°-500°C), com a completa combustão de qualquer tipo de combustível. Também é referido que as cinzas acabam por atuar como neutralizadores da acidez do solo devido às concentrações de K, Ca e Mg existentes nestas (Certini, 2005). Sendo assim, o aumento do pH é temporário devido ao aparecimento de novos húmus e à lixiviação das bases, no entanto, já foram registados períodos de 50 anos para a recuperação do pH original (Etiégni & Campbell, 1991). O pH deverá recuperar-se mais rápido após a remoção das cinzas, o que normalmente acontece por fenómenos de erosão.

A MO varia muito quando exposta ao aumento da temperatura causada pelos fogos, podendo ocorrer desde a sua completa eliminação até aumentos de 30% nas camadas mais superficiais devido a fatores vários como, por exemplo, a existência de folhas secas ou vegetação queimada (Abrams et al., 2001). Alguns dos fatores que influenciam esta variação são a humidade da MO, a severidade do incêndio e a topografia do terreno (González-Pérez et al., 2004). A sua eliminação acontece usualmente quando são atingidas temperaturas iguais e/ou superiores a 300°C.

Na Tabela 3 é apresentado um resumo da influência que os fogos podem ter em várias características mineralógicas, físico-químicas e biológicas dos solos.

Tabela 3. Influência dos fogos em diversas características dos solos (adaptado de *Certini, 2005*)

<b>Propriedades físicas, físico-químicas e mineralógicas</b>	
Repelência à água	A repelência natural à água do solo geralmente aumenta devido à formação de uma camada repelente de água contínua alguns centímetros abaixo da superfície. Implica redução na permeabilidade do solo e, conseqüentemente, aumento do escoamento superficial e erosão.
Estabilidade estrutural	Complexidade diminui como resultado da combustão de cimentos orgânicos.
Densidade aparente	Aumenta devido ao colapso dos agregados e à colmatação dos vazios pelas cinzas e pelos minerais argilosos dispersos. Como consequência, a porosidade e a permeabilidade do solo diminuem.
Granulometria	Não altera diretamente, mas o aumento da erosão pode remover seletivamente a fração fina.
pH	Aumenta. Em solos não calcários aumenta, ainda que efemeramente, pela libertação dos cátions alcalinos (Ca, Mg, K, Na) ligados à matéria orgânica.
Composição mineralógica	Muda, mas apenas em temperaturas superiores a 500°C.
Cor	Escurece devido à carbonização, e fica avermelhada devido à formação de óxidos de ferro.
Regime de temperatura	Muda temporariamente devido ao desaparecimento do manto vegetal e do escurecimento do solo (diminuição do albedo).
<b>Propriedades químicas</b>	
Teor em matéria orgânica	Diminui imediatamente após o incêndio, mas a longo prazo geralmente excede o nível pré-incêndio.

Qualidade de matéria orgânica	Muda notoriamente, com enriquecimento relativo da fração mais recalcitrante ao ataque bioquímico. Isto deve-se tanto à queima seletiva de resíduos frescos (folhas, galhos, etc.) como à neoformação de compostos aromáticos e altamente polimerizados (semelhantes a húmicos). O material carbonizado resultante da combustão incompleta, apresenta tempos de residência de séculos ou até mesmo milénio.
Capacidade de trocas	Baixa proporcionalmente com a perda de MO.
Saturação na base	Aumenta como consequência da libertação de bases na combustão da MO.
<b>Propriedades biológicas</b>	
Biomassa microbiana e sua composição	<p>Diminui; a recuperação de valores pré-fogo depende na capacidade das plantas se recolonizarem.</p> <p>A sua composição muda como consequência do efeito seletivo do fogo sobre alguns grupos de microrganismos e da modificação imposta à vegetação. Normalmente, a quantidade de fungos diminui mais comparando com a das bactérias.</p>
Biomassa de invertebrados que habitam o solo e sua composição	<p>Diminui, mas menos do que a massa dos microrganismos devido aos invertebrados terem mais mobilidade.</p> <p>A sua composição altera-se, pois, o tempo de recuperação dos invertebrados pré-fogo difere muito entre filos.</p>

---

## **2.7. Métodos de estudo dos impactos dos fogos nos solos**

As simulações em laboratório são uma técnica utilizada usualmente para estudar os impactos diretos da temperatura nas propriedades dos solos. O laboratório fornece-nos condições controladas para observar os efeitos da variação de temperatura e do período de contacto num tipo de solo específico, com condições de densidade e volume distintas. Este tipo de estudo pode ser realizado com o objetivo de observar e estudar os efeitos causados pela temperatura nos solos (Pereira et al., 2018).

Segundo Úbeda et al. e Bárcenas-Moreno e Baath (2009) o equipamento mais frequentemente utilizado para simular estas condições de incêndio, de forma a ser possível analisar o impacto da temperatura nos solos, é a mufla (Pereira et al., 2018).

Relativamente ao tempo de contacto, não existe um protocolo específico a seguir pois, em casos reais quando existe realmente combustão este está muito dependente de: inflamabilidade das espécies afetadas; temperatura atingida pelo fogo; comportamento do fogo (ex: fogo está a subir ou descer a encosta); intensidade do vento; vegetação está morta ou viva; humidade e distribuição da vegetação (ex: densidade e conectividade) (Pereira et al., 2010).

As propriedades físicas, químicas, mineralógicas e biológicas dos solos podem ser afetadas pela ocorrência de incêndios florestais (Certini, 2005).

---

## **Capítulo III**

### **Trabalho Experimental**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

### **3. Trabalho Experimental**

#### **3.1. Introdução**

O objetivo deste trabalho experimental foi avaliar o impacto da exposição de solos com características distintas a diferentes temperaturas. Para tal, dois solos com origens geológicas diferenciadas (calcário e granito) foram submetidos a três temperaturas diferentes, nomeadamente 350°C, 500°C e 650°C. Para avaliar o seu impacto deste aquecimento a elevadas temperaturas foram estudadas, nos diferentes provetes de solo, algumas propriedades, tais como, a cor, a granulometria, o pH, a condutividade elétrica, o teor de matéria orgânica, a composição elementar por FRX, a densidade aparente e a capacidade de retenção de água. Foi, adicionalmente, avaliada a sua modificação relativamente aos solos originais.

#### **3.2. Amostragem**

Foram selecionados dois locais de amostragem com geologias distintas, permitindo analisar o impacto da formação de base na suscetibilidade do solo ao efeito da temperatura.

A primeira amostragem foi executada em Portugal Continental (NUTS I), na região Norte de Portugal (NUTS II), na sub-região de Tâmega e Sousa (NUTS III), mais precisamente na freguesia de Boelhe numa zona de souto, em maciço granítico. A segunda amostragem foi realizada na região Centro de Portugal (NUTS II), na sub-região do Médio Tejo (NUTS III), mais especificamente na zona na Maxieira numa zona de pinhal, em maciço calcário no sopé da Serra de Aire, que pertence ao município de Ourém (Figura 6).

Em ambos os locais de amostragem as amostras foram recolhidas entre os 0 e os 20 cm de profundidade e com o recurso a uma pá, sendo assim classificadas como amostras remexidas (Figura 7). As duas amostras recolhidas foram colocadas em sacos de plástico, devidamente identificadas e encerradas; sendo seguidamente transportados para os laboratórios do ISEP. Já nos laboratórios do ISEP, ambas as amostras foram secas.



Figura 6. Zonas dos locais de amostragem (adaptado do Google Earth).



Amostragem do solo em Boelhe



Amostragem do solo na Maxieira

Figura 7. Locais de amostragem das amostras estudadas.

---

### 3.3. Preparação das Amostras

Nos ensaios de caracterização física e química executados, segundo os procedimentos usuais na área do Geoambiente, apenas é utilizada a fração inferior a 2 mm. Assim, para tal ser possível, foi necessário executar a preparação da amostra após secagem. Foi realizada a desagregação dos torrões existentes manualmente, remoção das raízes e, de seguida, a peneiração aos 2 mm. A peneiração foi executada manualmente, com recurso a crivos normalizados de 2 mm. As frações granulométricas obtidas (inferior e superior a 2 mm) foram armazenadas em sacos de plástico distintos (Figura 8).



Figura 8. Resultado da peneiração das duas amostras com recurso a peneiros de 2 mm.

Após a obtenção dos dois lotes com granulometrias diferentes e armazenamento da fração superior a 2 mm, foi executada a repartição dos dois lotes com granulometrias inferiores a 2 mm (solo de Boelhe e solo da Maxieira) em 4 partes, sendo seguidamente secos em estufa ventilada a 105°C, garantindo assim que apenas a matéria seca fosse utilizada. Obtiveram-se, assim, quatro provetes secos a 105°C para cada um dos solos. Dos quatro provetes de cada solo, um foi reservado como solo original (branco) e os restantes três foram individualmente expostos, em mufla, às temperaturas pré-definidas, 350°C, 500°C e 650°C. O aquecimento em mufla foi executado em rampa de 30 minutos até ser atingida a temperatura pretendida, a qual foi mantida durante 1h no nível definido. Após arrefecimento das amostras, foi novamente executada uma repartição dos lotes de solo em provetes com cerca de 30 a 60 g para se prosseguir com os vários ensaios de laboratório posteriormente realizados.

Na Figura 9 encontra-se um fluxograma demonstrativo dos vários passos seguidos no tratamento e preparação das amostras/provetas.

Ao longo deste trabalho os provetes de solo de Boelhe serão referenciados pela letra “B” e os da Maxieira pela letra “M”, de acordo com a síntese apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Designação dos provetes de solo utilizados no estudo laboratorial

	Original	Temperatura de Aquecimento		
		350°C	500°C	650°C
Boelhe	B0	B350-1	B500-1	B650-1
Maxieira	M0	M350-1	M500-1	M650-1



Figura 9. Várias etapas seguidas no tratamento das amostras.

### 3.4. Cor

A determinação aproximada da cor foi executada sobre provetes secos, com um suporte digital da Carta de Munsell (Munsell, 2020), pois não foi possível dispor da versão física do documento.

### 3.5. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi executada pelo Instituto de Ciências da Terra da Universidade do Minho. A sua determinação foi realizada através da técnica de difração a laser, recorrendo ao

---

equipamento Mastersize 3000 da Malvern, que consegue efetuar a medição do tamanho das partículas e analisar a sua distribuição.

### 3.6. Análise química elementar simplificada

A análise química elementar simplificada foi executada utilizando o método de fluorescência de raios-X. Neste processo foi utilizado o equipamento Nilton™ XL3t XRF Analyser (Figura 10).



Figura 10. Equipamento de bancada para a fluorescência de raios-X, Nilton™ XL3t XRF Analyser.

A análise química por fluorescência de raios-X é realizada a amostras de granulometria fina, tendo sido necessário efetuar uma moagem do material (utilizando um almofariz e pilão) e de seguida, uma crivagem. Para tal, foram utilizados os crivos Newark n.º 10 (2 mm) e n.º 60 (250 µm) segundo as especificações ASTM E-11 (Figura 11).



Figura 11. Análise química elementar simplificada por fluorescência de raios-X - equipamentos utilizados na preparação das amostras.

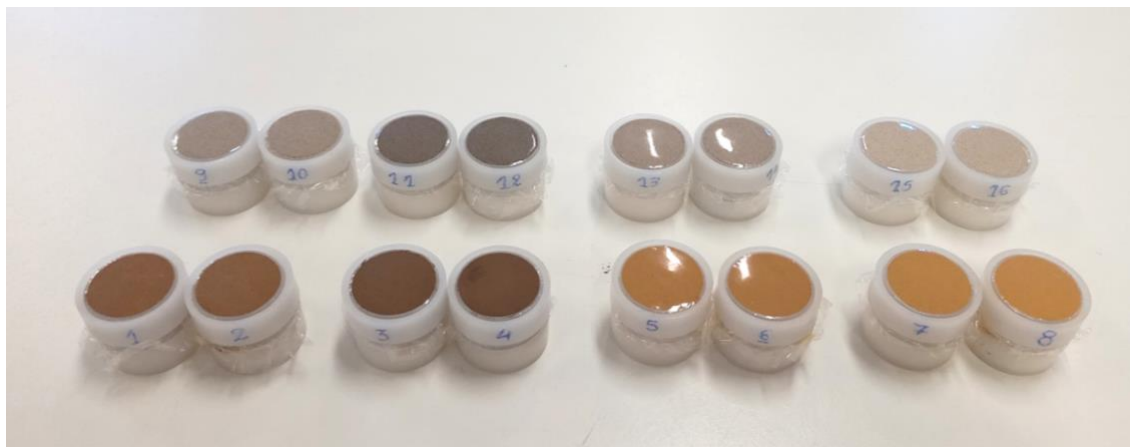


Figura 12. Análise química elementar simplificada por fluorescência de raios-X – provetes para análise.

Depois de ser realizada a crivagem, a fração com dimensão inferior a 250  $\mu\text{m}$  foi colocada e compactada em cápsulas de teflon próprias para o efeito (Figura 13). O resultado deste processo são os provetes representados na Figura 12, que foram utilizados para a análise por fluorescência de raios-X.

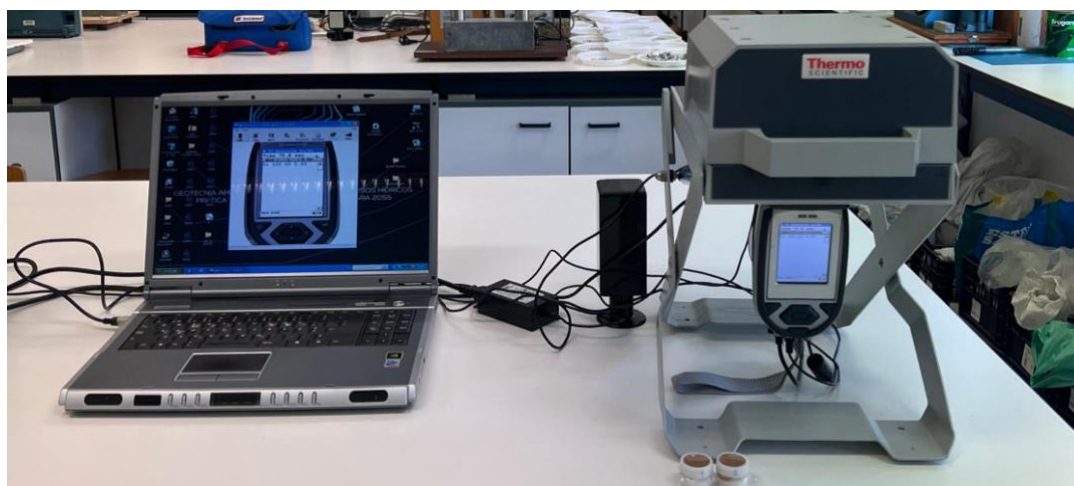


Figura 13. Realização das leituras por fluorescência de raios-X com o equipamento Nilton™ XL3t XRF Analyser.

O “modo operativo solo” permite a verificação da presença nos solos dos seguintes elementos apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Elementos determinados na análise química por fluorescência de raios-X, modo solo

Elementos determinados na análise química elementar simplificada						
Mo	Th	Au	Co	Ti	Ba	Cd
Zr	Pb	Zn	Fe	Sc	Cs	Ag
Sr	Se	W	Mn	Ca	Te	Pd
U	As	Cu	Cr	K	Sb	
Rb	Hg	Ni	V	S	Sn	

### 3.7. Determinação de pH

O pH foi determinado por potenciometria segundo a norma ISO 10390:2005 e realizada tanto em solução aquosa como em solução de cloreto de potássio. Os ensaios foram realizados em triplicado, com provetes de solo (fração menor que 2 mm) de cerca de 5 mL. O ensaio realizado (Figura 14), segundo as especificações da norma internacional, seguiu o seguinte procedimento:

1. Colocar a amostra de solo, 5 mL, num recipiente de 50 mL;
2. Adicionar 25 mL de água desionizada ou de solução de cloreto de potássio ( $C(KCl) = 0,01 \text{ mol/L}$ );
3. Colocar o recipiente com a suspensão de solo no agitador orbital (Bunsen AO-400) durante 60 min  $\pm$  10 min com rotação de 180 rpm;
4. Retirar o recipiente do agitador mecânico e deixar em repouso durante no mínimo 1h e máximo 3h, verticalmente.
5. Realizar a leitura do pH no sobrenadante, a uma temperatura de  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , com recurso ao medidor multiparâmetro HI-4522-02, da Hanna Instruments, com sonda HI 1131B.



Figura 14. Determinação do pH. Amostras no agitador mecânico (imagem à esquerda), amostras em repouso (imagem ao centro) e medição do pH (imagem à direita).

---

### 3.8. Determinação da condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi determinada segundo o procedimento estabelecido na norma ISO 11265:1994, sendo a medição realizada em solução aquosa. Os ensaios foram realizados em triplicado, com provetes de solo (fração menor que 2 mm) de cerca de 20 g. O ensaio realizado (Figura 15), segundo as especificações da norma internacional, seguiu o seguinte procedimento:

1. Colocar a amostra de solo (20 g) num recipiente de 100 mL;
2. Adicionar 100 mL de água desionizada;
3. Colocar o recipiente que contém a suspensão de solo no agitador mecânico Orbital AO-400 e agitar durante 30 min a 180 rpm;
4. Retirar o provete do agitador e filtrar a solução com papel de filtro quantitativo 434 (retenção de partículas de 2-3  $\mu\text{m}$ );
5. Realizar a medição da CE, na solução filtrada, a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , com recurso ao medidor multiparâmetro HI-4522-02, da Hanna Instruments, com a sonda HI 76312.



Figura 15. Determinação da condutividade elétrica. Filtragem da amostra agitada (imagem da esquerda) e amostra filtrada preparada para medição da condutividade elétrica (imagem da direita).

### 3.9. Determinação do teor matéria orgânica

A determinação do teor em matéria orgânica foi executada por gravimetria com inceneração em mufla a  $400^{\circ}\text{C}$ . Os ensaios foram executados em quadruplicado, com provetes de solo (fração menor que 2 mm) de cerca de 5 g (Jones, J., 2001). No presente trabalho o teor em matéria orgânica só foi determinado nas amostras originais de solo (B0 e M0) e nas amostras sujeitas a aquecimento de  $350^{\circ}\text{C}$  (B350-1 e B350-1) uma vez que não faz sentido determinar teor em matéria orgânica em amostras de solo previamente expostas a temperaturas superiores a  $400^{\circ}\text{C}$ , como é o caso de B500-1, B650-1, M500-1 e M650-1.

---

O ensaio realizado (Figura 16), seguiu o seguinte procedimento:

1. Pesar um recipiente limpo e previamente seco;
2. Pesar, dentro do recipiente, o solo húmido com cerca de 20 g (4 x 5 g);
3. Colocar o recipiente com o solo húmido a secar numa estufa ventilada, a uma temperatura de 105°C até massa constante;
4. Retirar da estufa o recipiente com o provete de solo seco e deixar arrefecer em ambiente com humidade controlada (exsicador);
5. Calcinar os cadinhos que irão ser utilizados na inceneração a 900°C. O aquecimento até aos 900°C é executado em rampa de 1h e depois permanece nos 900°C durante 30 minutos;
6. Retirar cadinhos da mufla e deixar arrefecer em ambiente com humidade controlada;
7. Manuseando com o auxílio de uma pinça, retirar os cadinhos do exsicador, determinar a sua massa após calcinação ( $M_r$ ) e identificar respetivamente cada um com as amostras que lhes são colocadas;
8. Colocar 5 g de solo seco a 105°C em cada cadinho ( $M_{105}$ );
9. Colocar os cadinhos com os provetes de solo seco na mufla e incinerar a 400°C durante 4 h;
10. Deixar arrefecer, dentro da mufla, até ser possível retirar os cadinhos. Colocar os cadinhos no exsicador e deixar terminar o arrefecimento;
11. Determinar a massa total do recipiente mais provete de solo após a incineração ( $M_{400}$ );
12. Calcular a quantidade de matéria orgânica através da
13. Equação 2.

$$MO = \frac{M_r + M_{105} - M_{400}}{M_{105}} \times 100$$

Equação 2. Cálculo da quantidade de matéria orgânica.



---

Figura 16. Determinação do teor em matéria orgânica. Amostras em ambiente de humidade controlada (imagem da esquerda) e amostras prontas a retirar após 4h na mufla (imagem da direita).

### 3.10. Determinação da densidade aparente do solo

A determinação da densidade aparente foi executada em provetes de solo remexido e seco a 105°C, segundo um dos métodos propostos por EMBRAPA, 2017 (Manual de Métodos de Análise de Solo – 3ª Edição)(César et al., 2017).

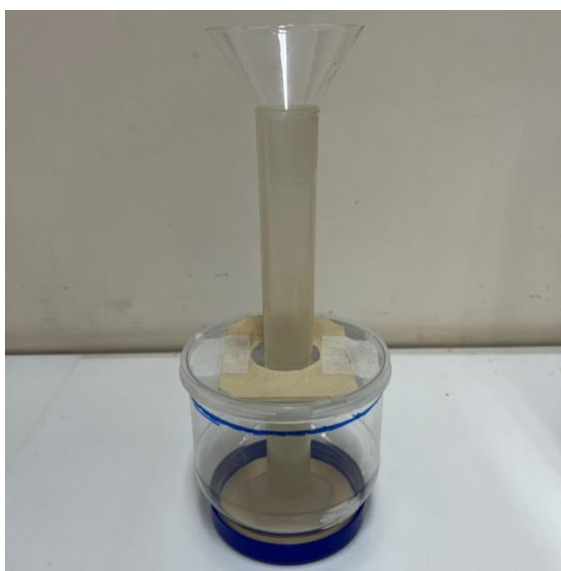


Figura 17. Sistema utilizado para a execução do ensaio de determinação da densidade aparente do solo.

O ensaio realizado (Figura 17) seguiu o seguinte procedimento:

1. Secar a amostra de solo remexida na estufa a 105°C;
2. Pesou-se uma proveta plástica com capacidade de 100 mL ( $M_1$ );
3. Encher a proveta de solo, colocando cerca de 35 mL, de cada vez, deixando cair de uma só vez e em seguida compactar o solo batendo a proveta 10 vezes sobre uma manta de borracha de 5 mm de espessura, com uma altura de queda de 10 cm.
4. Repetir o passo anterior mais 2 vezes, até que o nível da amostra fique nivelado com um traço do aferimento da proveta e determinar o volume ocupado ( $V$ );
5. Pesar a proveta com a amostra de solo ( $M_2$ );
6. Calcular a densidade aparente ( $\rho$ ), através da Equação 3 que é expressa em  $\text{g}/\text{cm}^3$  ou em  $\text{kg}/\text{m}^3$ .
7. Calcular a massa de solo seco introduzido na proveta ( $M_3 = M_2 - M_1$ )

---

$$\rho = \frac{M_3}{V}$$

Equação 3. Cálculo da densidade aparente no ensaio laboratorial.

### 3.11. Determinação da capacidade de retenção de água

A determinação da capacidade de retenção de água no solo (CRA) em laboratório, foi executada pelo método do funil em amostras de solo seco remexidas, adaptando o procedimento proposto por Álvaro-Fuentes, Lóczy, Sören, Zornoza, 2019, no *Handbook of Plant and Soil Analysis for Agricultural Systems*. Baseia-se na percolação de água em excesso por uma massa conhecida de solo, de forma a se determinar, posteriormente, a massa de água retida nessa mesma massa de solo. O ensaio (Figura 18) seguiu o procedimento seguinte:

1. Secar a amostra de solo na estufa a 105°C;
2. Preparação do branco:
  - a. Pesar um funil e o filtro seco ( $M_1$ );
  - b. Pesar 50 g de água desmineralizada ( $M_2$ );
  - c. Colocar um funil com o papel de filtro seco na proveta;
  - d. Deitar toda a massa de água no filtro garantindo que todo o filtro fica humedecido;
  - e. Deixar escoar até parar de gotejar;
  - f. Pesar o funil com o filtro húmido ( $M_3$ );
  - g. Determinar a massa de água retida no filtro ( $M_4$ ):  $M_4 = M_3 - M_1$ .
3. Procedimento do ensaio:
  - a. Determinar a massa da proveta de 100 mL ( $M_5$ );
  - b. Pesar uma massa de solo seco de cerca de 20 g ( $M_6$ );
  - c. Pesar uma massa de água desmineralizada ( $M_7$ ) de 50 ou 75 g;
  - d. Colocar um funil com o papel de filtro seco na proveta;
  - e. Colocar o solo pesado ( $M_6$ ) no papel de filtro;
  - f. Adicionar a água pesada ( $M_7$ ) aos poucos, de forma que esta não transborde o filtro;
  - g. Deixar a água percolar no solo até parar de gotejar (1h nas adições de 50 g e 1h30min nas adições de 75 g de água);
  - h. Pesar a proveta com a água percolada ( $M_8$ );
  - i. Determinar a massa de água percolada e retida no filtro ( $M_9$ ):  $M_9 = (M_8 - M_5) + M_4$ ;
  - j. Determinar a massa de água retida no solo ( $M_{10}$ ):  $M_{10} = M_7 - M_9$ ;

- 
- k. Calcular CRA através da Equação 4, expressa em mL/g (considerando a densidade da água como 1 g/mL).

$$CRA = \frac{M_{10}}{M_6}$$

Equação 4. Cálculo da capacidade retenção de água.

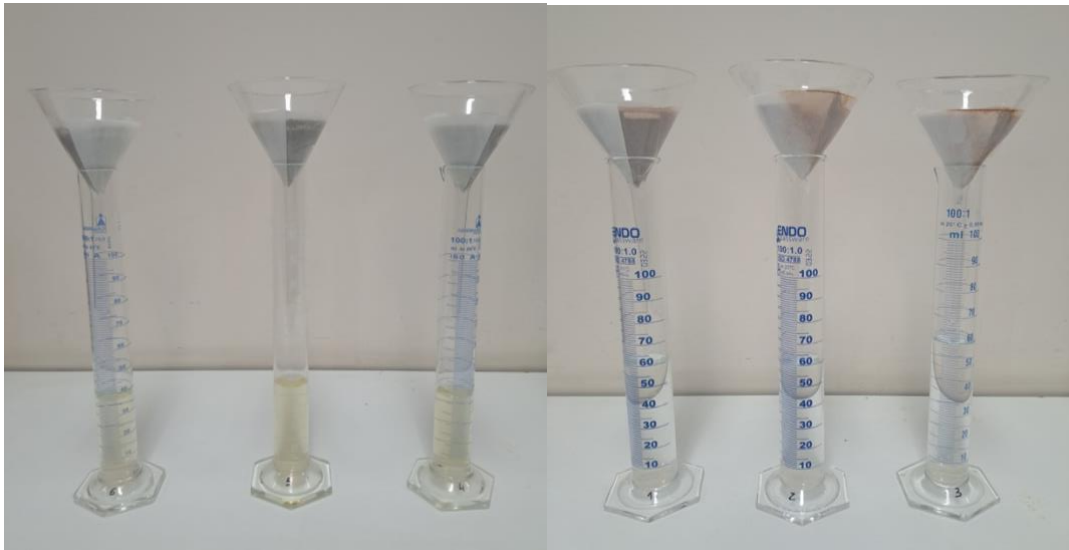


Figura 18. Determinação da capacidade de retenção de água do solo. Amostras de Boelhe (imagem à esquerda). Amostras de Maxieira (amostras à direita).

---

## **Capítulo IV**

### **Análise e Discussão de Resultados**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 4. Análise e Discussão de Resultados

### 4.1. Cor

Na Figura 19 é apresentada a cor das amostras estudadas, à esquerda o solo original e, depois, consecutivamente, os provetes sujeitos a temperatura crescente. Como se pode verificar os solos variam de cor consoante são submetidos a diferentes temperaturas. Em ambos os casos (B e M), a cor do solo escurece aos 350°C, clareando depois progressivamente a 500°C e 650°C. O solo da Maxieira apresenta tonalidade mais alaranjada o que se acentua a altas temperaturas. Estes resultados estão de acordo com o referido na bibliografia estudada que aponta para escurecimento devido à carbonização a temperaturas não muito altas e alteração para tons mais amarelados ou avermelhados devido à formação de óxidos de ferro a médias e altas temperaturas, respetivamente (Ulery & Graham, 1993; Ketterings & Bigham, 2000; Certini, 2005).

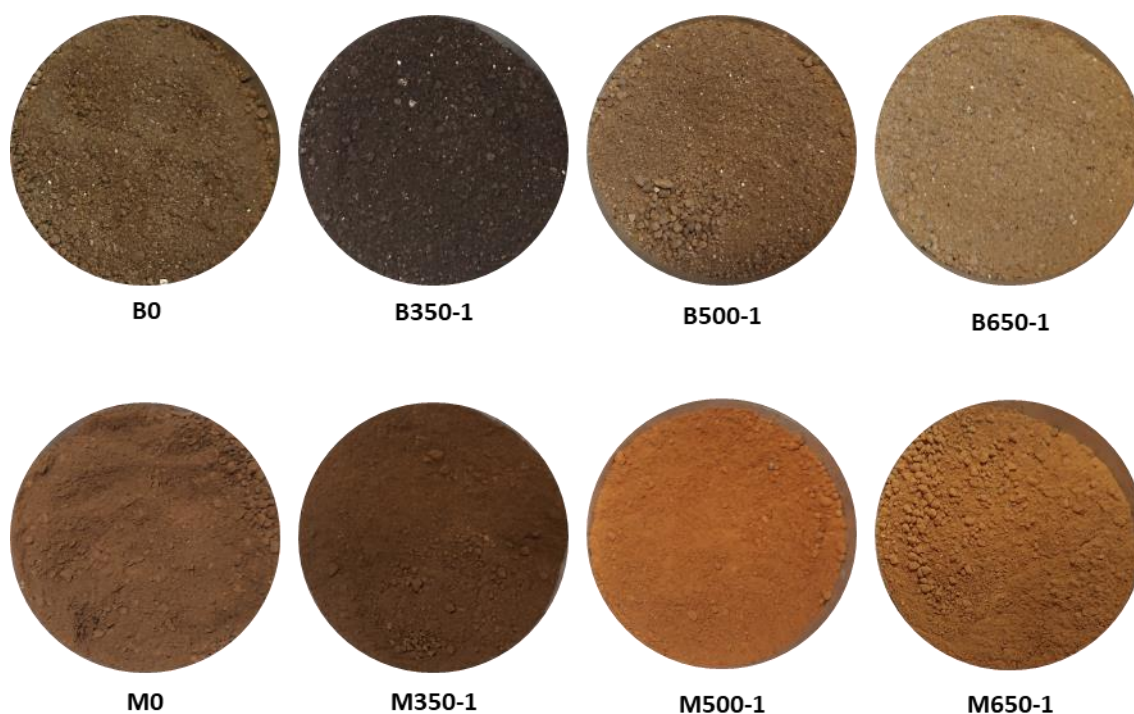


Figura 19. Representação das diversas cores das amostras estudadas e sua respetiva identificação.

Relativamente à classificação da cor dos solos, não foi possível dispor de uma Carta de Munsell (Munsell, 2000) em suporte físico, foi, no entanto, feita uma classificação aproximada em laboratório, em amostras remexidas, pela comparação visual de amostras secas utilizando-se uma versão digital da referida carta, tendo-se obtido os resultados sintetizados na Tabela 6. Estes resultados apontam para predominância de cores amareladas e avermelhadas nos solos expostos aos vários níveis de temperatura, relacionadas com a presença de óxidos de ferro.

Tabela 6. Resultados da classificação relativa à propriedade cor, determinada em laboratório

<b>B0</b>	<b>B350-1</b>	<b>B500-1</b>	<b>B650-1</b>
5YR 6/3	7,5YR 4/3	5YR 6/4	10YR 8/4
<b>M0</b>	<b>M350-1</b>	<b>M500-1</b>	<b>M650-1</b>
5YR 5/8	5YR 5/6	5YR 6/8	5YR 6/8

## 4.2. Análise Granulométrica

As proporções médias de argila, silte e areias obtidas para os solos originais e para os submetidos às três temperaturas definidas (350°C, 500°C e 650°C) encontram-se representadas seguidamente. Na Figura 20 encontra-se a análise granulométrica do solo de Boelhe (B), de matriz granítica, onde podemos observar que:

- o solo original (B0) apresenta cerca 2% de argila, 30% de silte e 68% de areias, predominando a areia fina (100-250 µm).
- a amostra submetida a 350°C (B350-1) tem cerca de 3% de argila, 33% de siltes e 64% de areias, predominantemente fina.
- a amostra B500-1 tem percentagens de argila de cerca de 2%, siltes a rondar os 30% e 68% de, com predominância de areia fina.
- a amostra submetida à temperatura mais elevada, B650-1, apresenta valores de cerca de 1% de argilas, 24% de siltes e 75% de areias, sendo a areia fina a mais representativa desta fração.

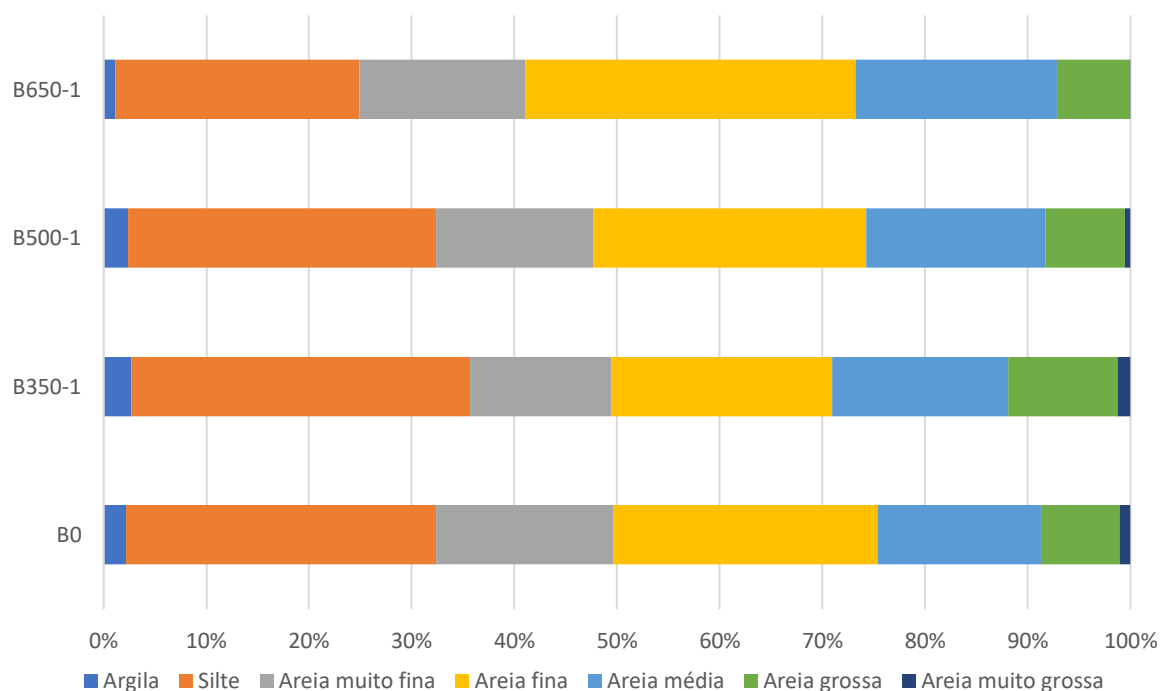


Figura 20. Frações granulométricas do solo de Boelhe (original e exposto a 350 °C, 500 °C e 600°C).

---

Podemos então constatar que no solo de Boelhe, na gama de temperaturas estudadas, as variações granulométricas com o aquecimento são reduzidas até aos 500°C, notando-se aos 650°C um aumento de 12% relativamente ao valor inicial em B0 da fração “areia total”; na avaliação das subfrações arenosas verifica-se que este aumento ocorre fundamentalmente ao nível das areias finas e médias. Verifica-se, ainda, que aos 350°C ocorreu uma ligeira diminuição da fração arenosa global cuja recuperação para valores semelhantes ao inicial ocorreu seguidamente aos 500°C. A fração “silte” tem um comportamento bastante semelhante verificando-se a maior variação aos 650°C, com diminuição de 20% relativamente ao valor inicial. Na fração argilosa, ocorrem oscilações ao longo do aquecimento, existe um aumento de 0,5% de B0 para B350-1 e depois, conforme as amostras são expostas a temperaturas mais elevadas acontece uma diminuição progressiva até 1% o que corresponde a 50% do valor inicial em B0.

Na Figura 21 encontram-se os resultados da análise granulométrica ao solo da Maxieira (M), de matriz calcária, onde podemos observar que:

- o solo original (M0) apresenta cerca 4% de argila, 40% de silte e 56% de areias, sendo predominante a areia muito fina (50-100 µm).
- na amostra submetida a 350°C (M350-1) ocorrem 9% de argila, 63% de silte e 28% de areia, com as areias mais grosseiras e grosseiras a deixarem de ter representação.
- na amostra M500-1 temos percentagens de argila de cerca de 9%, de siltes 72% e de areias 19%, com apenas existência de areia muito fina e areia fina.
- a amostra M650-1, apresenta valores de cerca de 3% de argilas, 55% de siltes e 42% de areias, sendo a areia muito fina (50-100 µm) a mais representativa desta fração.

Sendo assim, ocorre um aumento das frações de argila e siltes até aos 500°C e à temperatura de 650°C ocorre diminuição destas duas frações granulométricas, aproximando-se os valores dos iniciais. Relativamente à fração arenosa há diminuição de 56% para 28% e, seguidamente, para 19%, de M0 para M350-1 e depois M500-1, respetivamente. Contrariamente à tendência anterior, quando avaliamos M650-1 verifica-se que a quantidade de areia volta a aumentar, aproximando-se do valor de M0. Salienta-se ainda o facto de em M0 ter sido possível identificar todas as subfrações arenosas, enquanto em M350-1, M500-1 e M650-1 não terem sido identificadas areias grossas e areias muito grossas e, as areias médias, quando presentes, serem residuais.

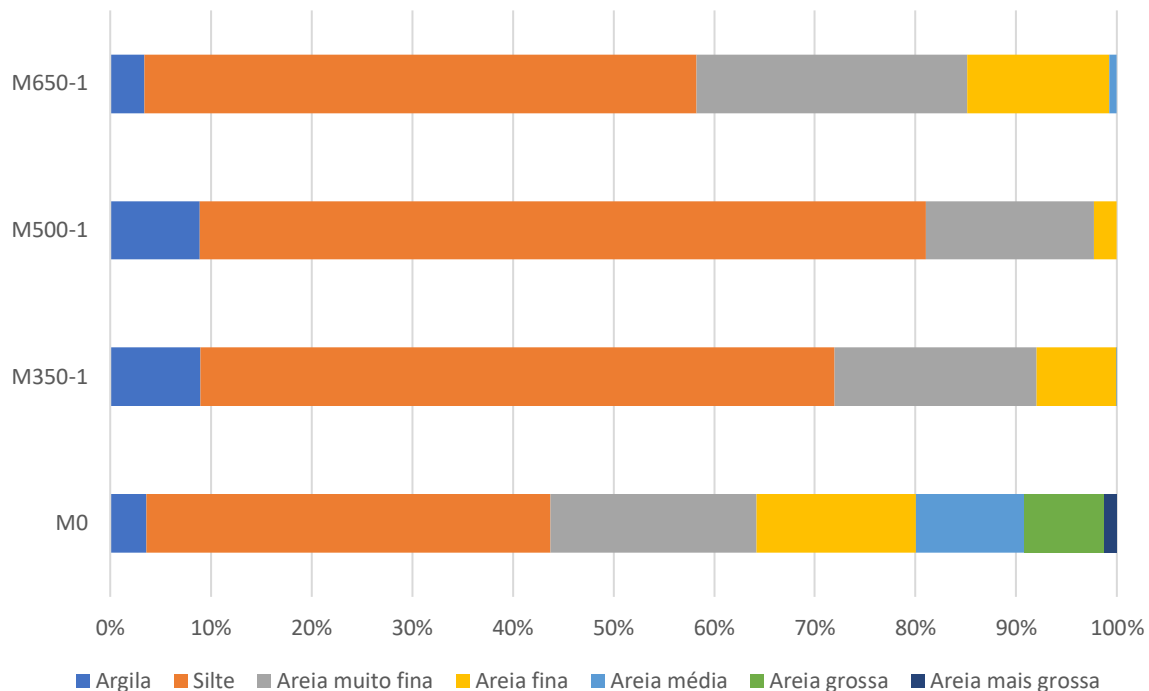
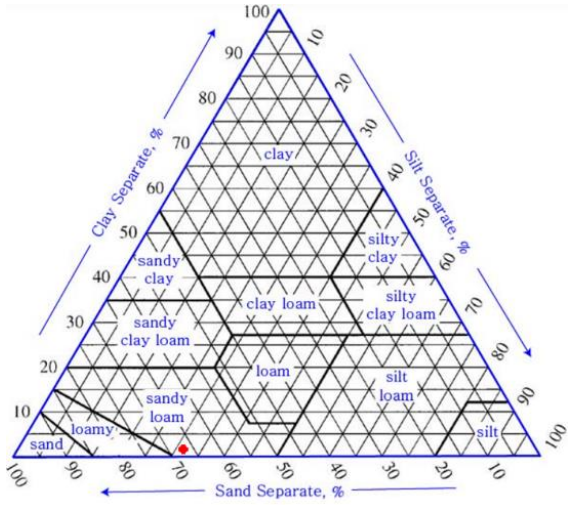


Figura 21. Frações granulométricas do solo da Maxieira (original e exposto a 350 °C, 500 °C e 600°C).

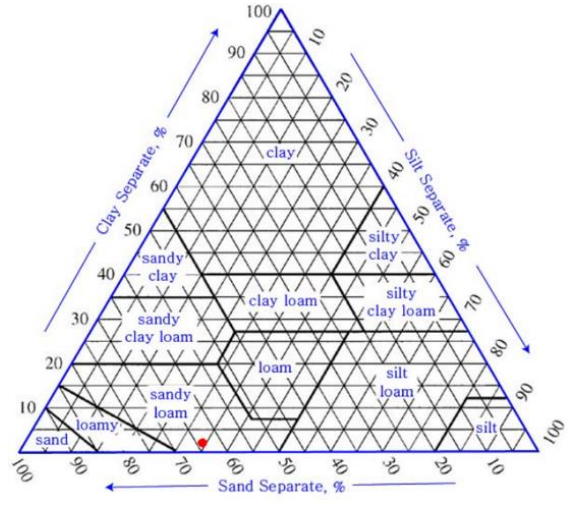
Da análise granulométrica dos dois solos em estudos podemos constatar que nos solos originais a fração arenosa é a predominante em ambos os casos, mas, após sujeitar os solos às temperaturas preconizadas, a fração arenosa permanece dominante no caso do solo de Boelhe, enquanto no solo da Maxieira passa a predominar a fração siltosa. Poderá assim concluir-se que o efeito da temperatura na granulometria é mais sentido no solo carbonatado, ocorrendo logo aos 350°C.

De acordo com os valores obtidos na análise granulométrica, foi executada a classificação textural dos solos em estudo, segundo os critérios propostos pelo USDA. Podemos verificar que os resultados indicam que:

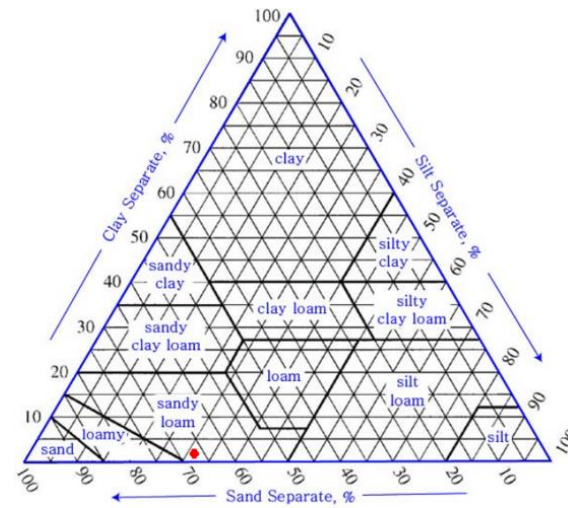
- No solo de Boelhe (Figura 22) temos as 3 primeiras amostras (B0, B350-1 e B500-1) classificadas como franco-arenosas e B650-1 é classificada como uma areia franca.
- No solo da Maxieira (Figura 23) temos M0 como franco-arenosa e as 3 restantes (M350-1, M500-1 e M650-1) classificadas como franco-siltosa.



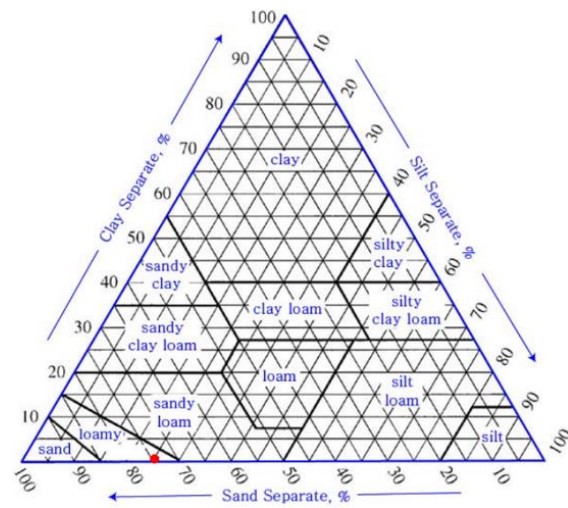
**B0**



**B350-1**

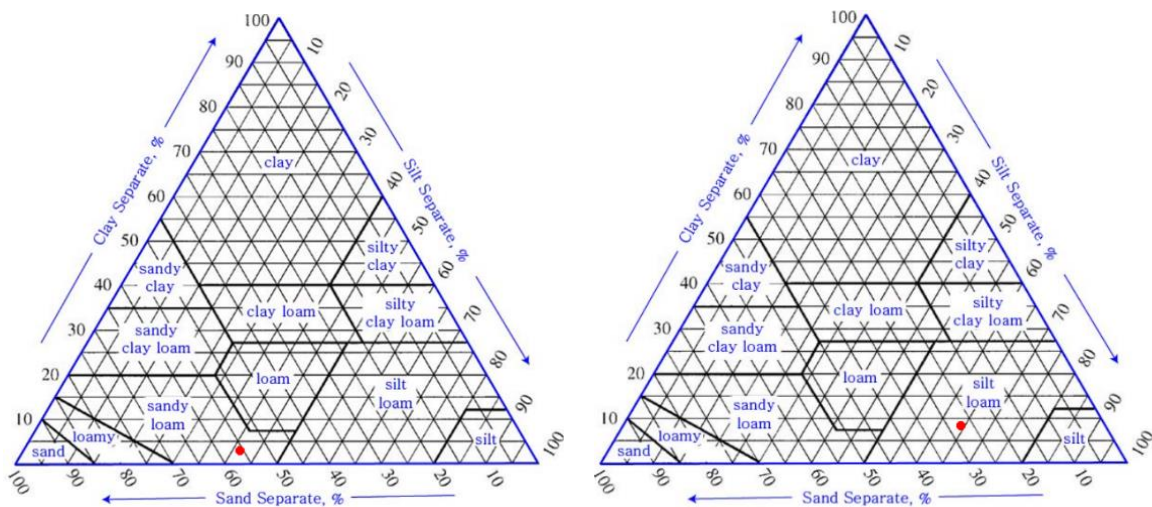


**B500-1**



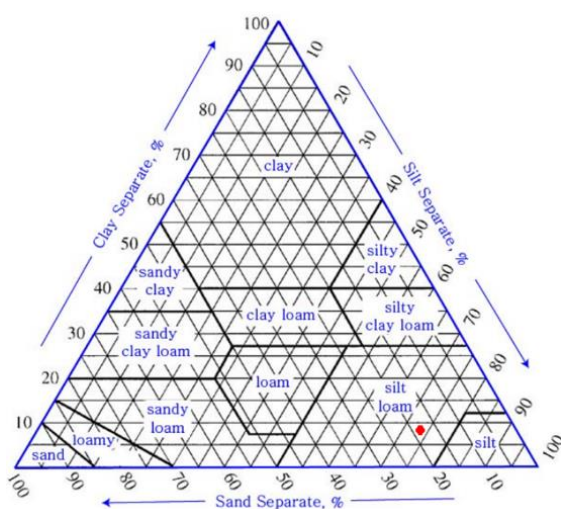
**B650-1**

Figura 22. Triângulos de classificação textural do solo de Boelhe segundo os critérios propostos pelo USDA.

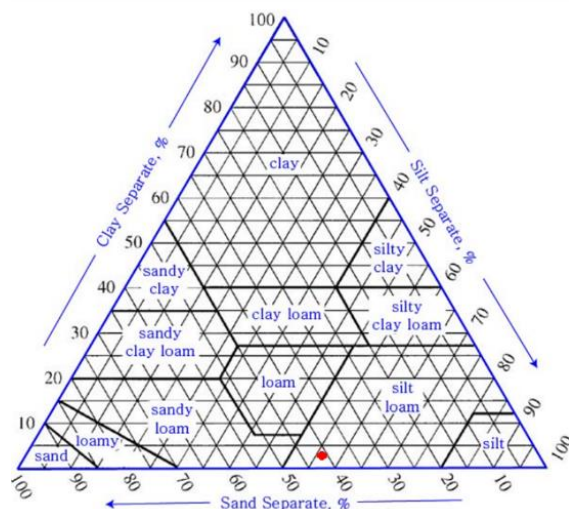


**M0**

**M350-1**



**M500-1**



**M650-1**

Figura 23. Triângulos de classificação textural do solo da Maxieira segundo os critérios propostos pelo USDA.

Assim, a variação de temperatura levou à alteração da classificação textural dos solos, sendo que para os solos de Boelhe esta alteração foi apenas sentida quando as amostras foram submetidas a 650°C, ao contrário do verificado para o solo da Maxieira, no qual foram apenas necessários 350°C para que a alteração de textura se verificasse. Os resultados obtidos estão em concordância com a bibliografia, que nos refere que com a temperatura ocorre um aumento da fração siltosa do solo (Verma & Jayakumar, 2012).

---

### 4.3. Análise Elementar Simplificada

Os valores da análise química elementar simplificada foram determinados para as amostras dos solos originais e para as amostras submetidas às três temperaturas distintas (350°C, 500°C e 650°C) e obtidos por fluorescência de raio-X (FRX), operando em modo solo que permite avaliar a presença dos elementos apresentados na Tabela 5. A representação dos elementos foi dividida em dois, nas Figuras 24 e 25 estão apresentados os elementos com maior representatividade percentual, com concentrações superiores a 800 ppm, e as Figuras 26 e 27 são referentes à representação dos restantes elementos presentes com menores concentrações.

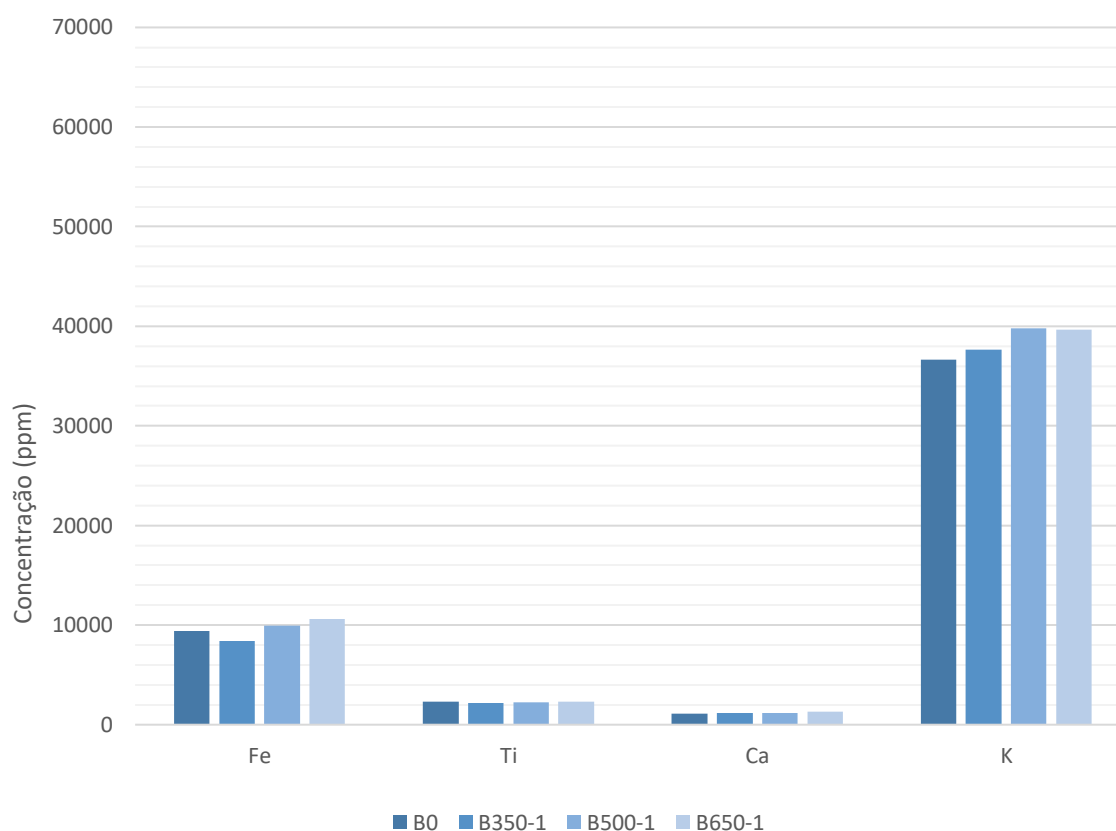


Figura 24. Principais elementos detetados no solo de Boelhe e respectivas concentrações médias determinadas por FRX no modo solo.

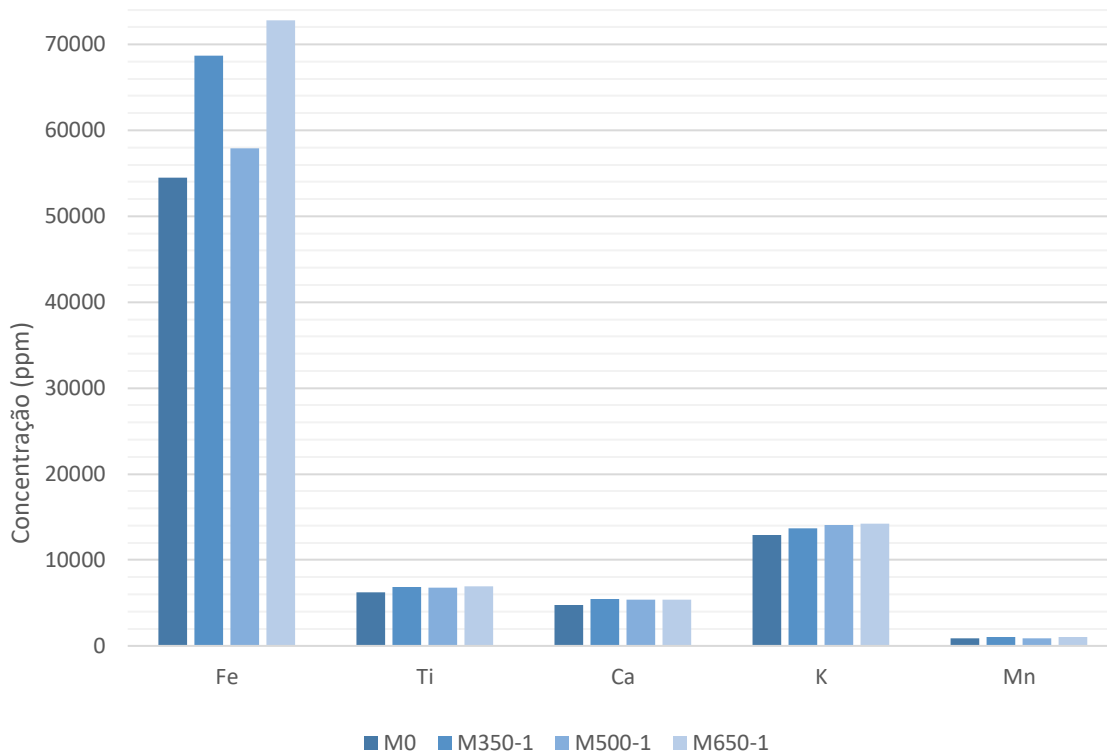


Figura 25. Principais elementos detetados no solo da Maxieira e respetivas concentrações médias determinadas por FRX no modo solo.

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 24 e 25 verifica-se que nos dois solos, como elementos predominantes comuns surgem o ferro (Fe), o potássio (K), o titânio (Ti) e o cálcio (Ca); no caso da Maxieira o manganês (Mn) também apresenta concentrações superiores a 800 ppm.

No solo de Boelhe (Figura 24) verifica-se que:

- o elemento com mais concentração é o potássio, com concentrações entre cerca de 36 600 a 40 000 ppm, ocorrendo aumento progressivo da concentração com o aquecimento do solo.
- de seguida o ferro com concentrações a oscilar entre de cerca de 8 400 a 10 600 ppm; relativamente ao valor original, a sua concentração diminui a 350 °C, aumentando depois, progressivamente, com o aquecimento.
- o titânio e o cálcio apresentam concentrações de ppm na ordem dos 2 000 e 1 000, respetivamente, não revelando alterações representativas associadas ao aquecimento do solo.

---

No solo da Maxieira (Figura 25) temos:

- o ferro como elemento dominante, com concentrações entre cerca 54 500 e 72 800 ppm, oscilando com o aumento de temperatura, apresentando os valores mais elevados em M350-1 e M650-1.
- o potássio com concentrações entre cerca de 12 900 e 14 200 ppm, com aumento progressivo da concentração com o aquecimento do solo.
- o cálcio e o titânio com valores bastante semelhantes de cerca de 5 000 e os 7 000 ppm, respetivamente, não revelando grandes alterações por aquecimento do solo.
- finalmente, o manganês com os valores mais baixos, de cerca de 800 a 1 000 ppm.

Relativamente aos elementos detetados que apresentam menores concentrações tem-se que:

- no solo de Boelhe (Figura 26) os elementos que se destacam são o enxofre (S), o bário (Ba), o rubídio (Rb), o manganês (Mn), o zircónio (Zr), estrôncio (Sr), o zinco (Zn) e o cobre (Cu). Verificando-se, ainda, que: a concentração do enxofre aumenta muito de B0 para B350-1, não sendo depois detetado em B500-1 e B650-1; apresentam tendência semelhante para diminuir de B0 para B350-1 e depois aumentar progressivamente até B650-1 o Rb, Mn, Zr, Sr e Cu; e, no caso do bário verifica-se aumento progressivo com o aumento da temperatura. Tendo-se, ainda, registado a ocorrência de molibdénio (Mo), urânio (U), tório (Th), chumbo (Pb), selénio (Se), arsénio (As), mercúrio (Hg), tungsténio (W), céσιο (Cs), antimónio (Sb) e estanho (Sn).
- no solo da Maxieira (Figura 27) os elementos que se destacam são o zircónio (Zr), o rubídio (Rb), o enxofre (S), o bário (Ba), o crómio (Cr), o vanádio (V), o cobalto (Co), o níquel (Ni) e o rubídio; nos casos do bário e do níquel verifica-se aumento progressivo com o aumento da temperatura, nos restantes casos não há uma tendência clara, ocorrendo aumentos e diminuições com o aquecimento. Tendo-se, ainda, registado a ocorrência de molibdénio (Mo), Sr, urânio (U), tório (Th), chumbo (Pb), selénio (Se), arsénio (As), zinco (Zn), tungsténio (W), escândio (Sc) e prata (Ag).

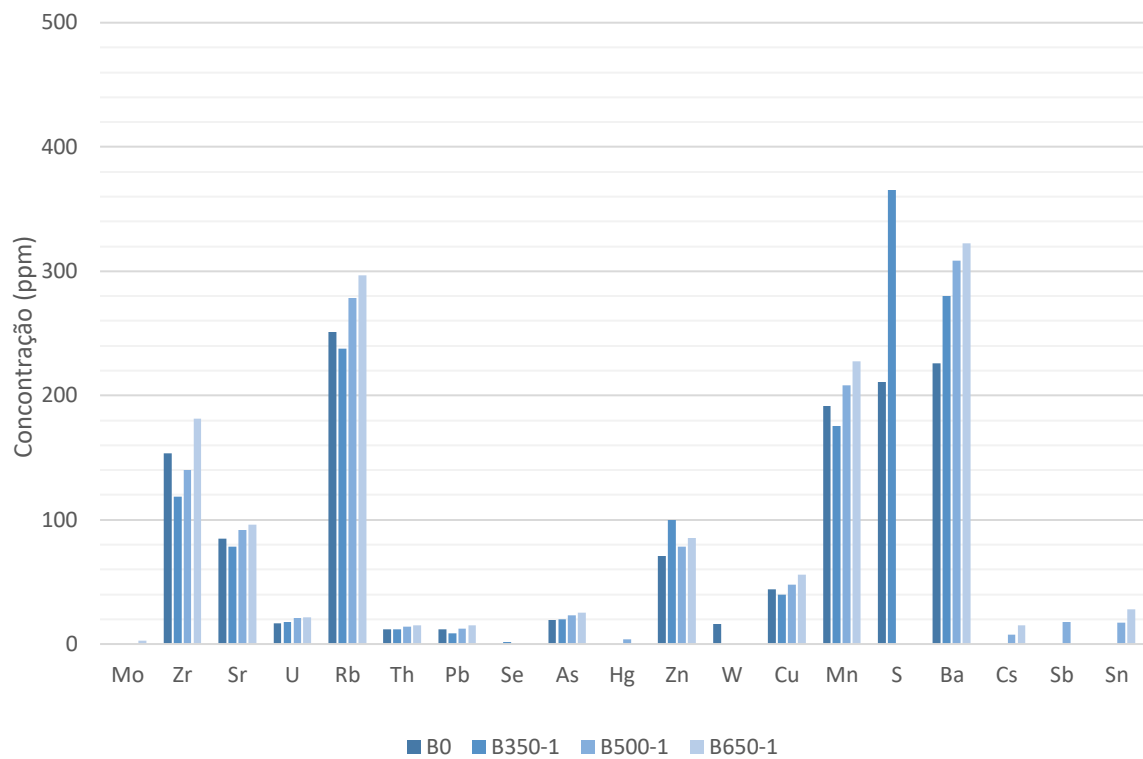


Figura 26. Concentrações médias dos elementos menores detetados no solo de Boelhe por FRX em modo solo.

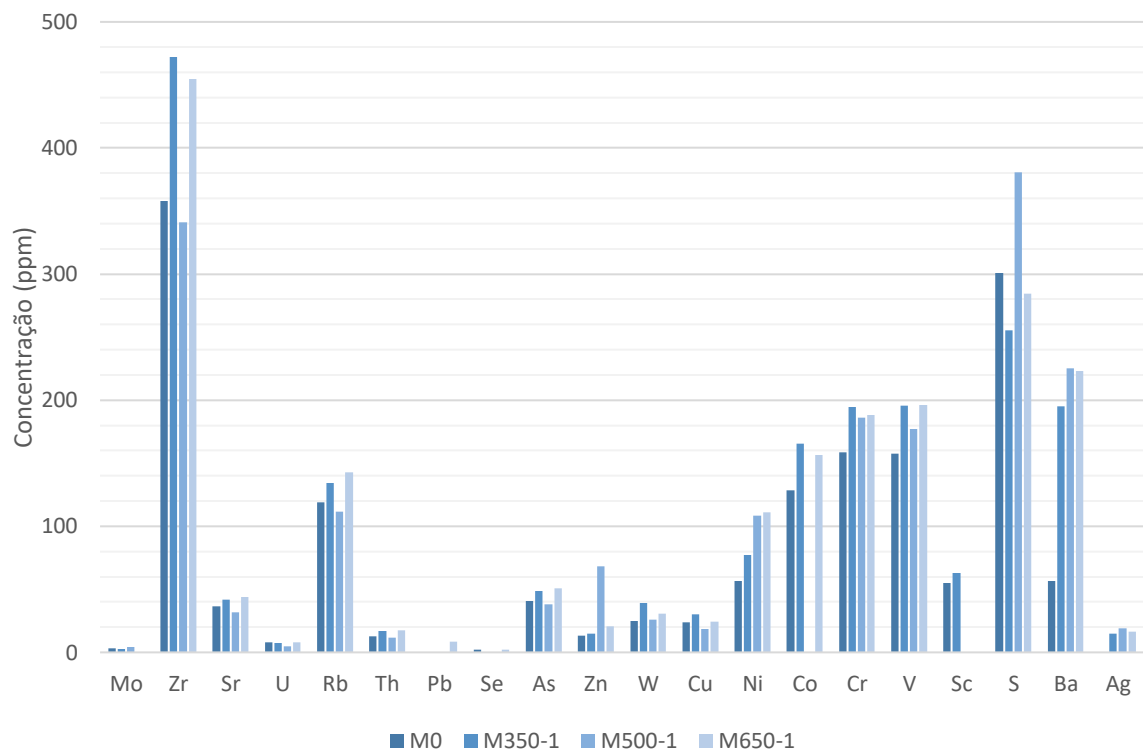


Figura 27. Concentrações médias dos elementos menores detetados no solo da Maxieira por FRX em modo solo.

---

## 4.4. pH

### 4.4.1. pH em H<sub>2</sub>O

Os valores de pH em H<sub>2</sub>O foram determinados para as amostras originais e para as amostras submetidas às três temperaturas distintas (350°C, 500°C e 650°C) e são seguidamente apresentados.

Na Figura 28 apresentam-se os valores médios de pH em água obtidos em laboratório para o solo de Boelhe. O solo original B0 apresentou pH ácido, em média 5,45, e após aquecimento às diferentes temperaturas passou, em todos os casos, a apresentar pH neutro, com valores médios de 7,15, 7,16 e 7,01, para as amostras B350-1, B500-1 e B650-1, respetivamente. Os valores médios obtidos nas triplicatas são bastante semelhantes entre si, com desvios padrão entre 0,031 e 0,102.

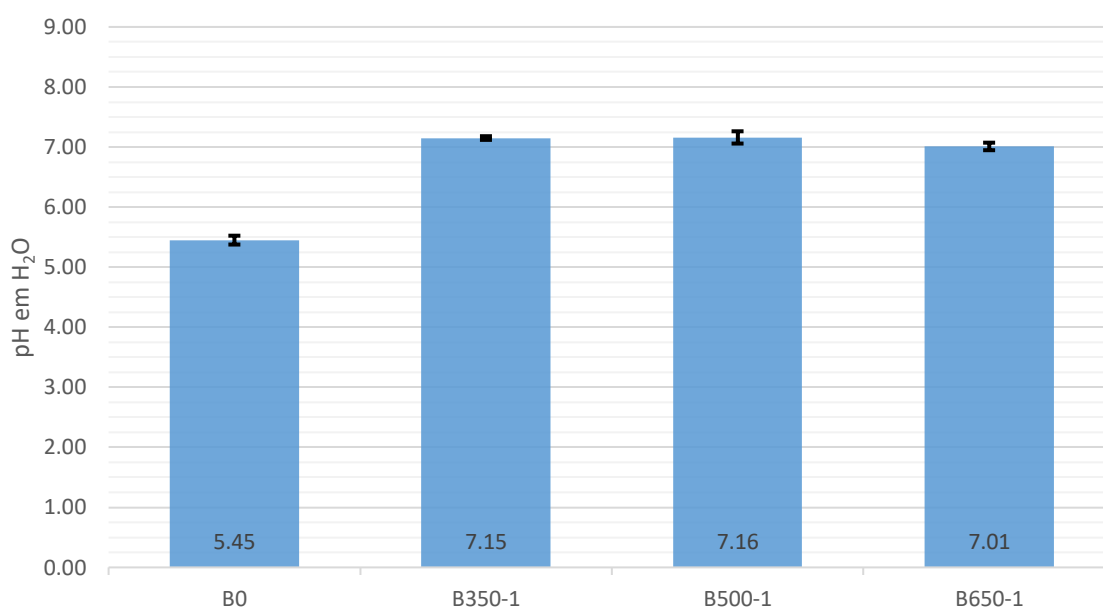


Figura 28. Valores médios de pH em H<sub>2</sub>O para o solo de Boelhe e respetivo desvio padrão.

Na Figura 29 estão representados os valores médios de pH em água obtidos em laboratório para o solo da Maxieira. O solo original apresentou pH ligeiramente ácido, em média 6,03. As amostras de solo sujeitas às temperaturas preconizadas revelaram pH alcalino, com valores médios de 8,04, 8,52 e 8,62, para as amostras M350-1, M500-1 e M650-1, respetivamente. Os ensaios foram realizados em triplicata e os resultados obtidos no ensaio apresentam baixos desvios padrão, entre os 0,024 e os 0,116.

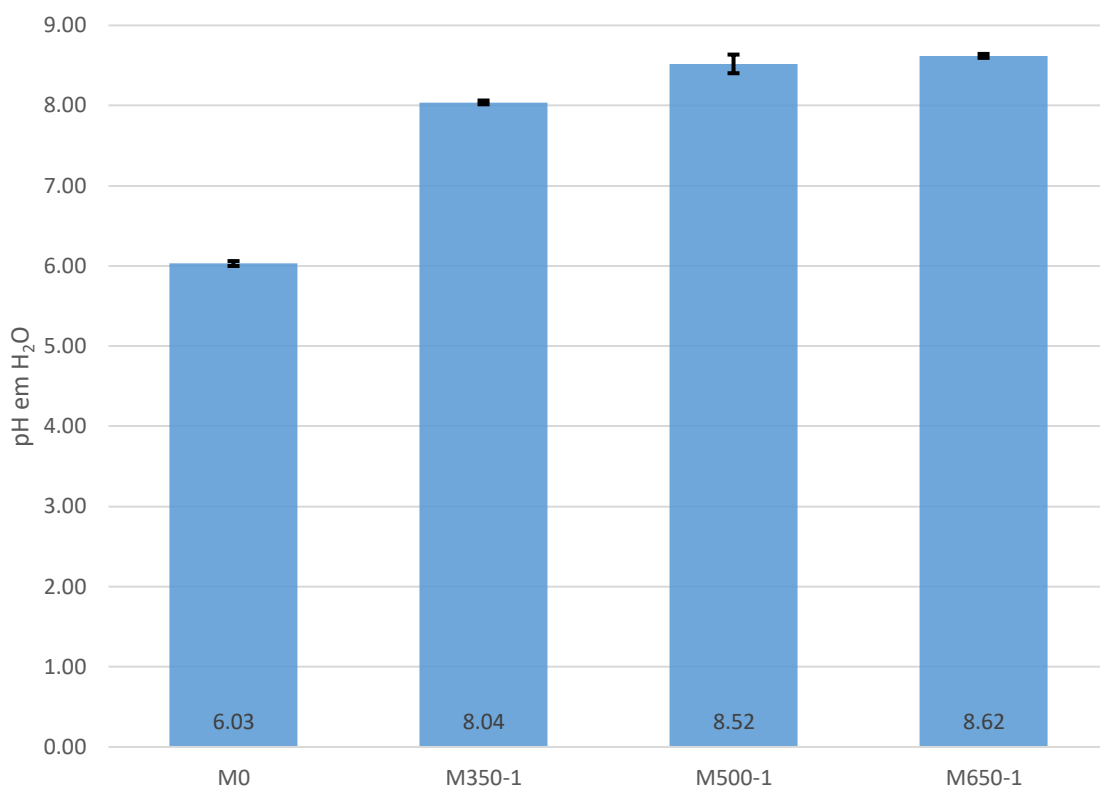


Figura 29. Valores médios de pH em H<sub>2</sub>O para o solo da Maxieira e respetivo desvio padrão.

Podemos assim concluir que o aumento da temperatura influencia o pH em água dos solos originais, aumentando-o em ambas os casos, os solos inicialmente ácidos passam com a submissão a temperaturas elevadas a neutros no caso do solo de Boelhe e básico no solo da Maxieira.

#### 4.4.2. pH em KCl

Os valores de pH em KCl foram determinados para as amostras originais e para as amostras submetidas às três temperaturas distintas (350°C, 500°C e 650°C) e são seguidamente apresentados.

Na Figura 30 representam-se os valores médios de pH obtidos para o solo de Boelhe. O solo original (B0) apresenta pH médio de 4,52, o que lhe confere carácter ácido. Os solos B350-1, B500-1 e B650-1 apresentaram carácter ligeiramente ácido a neutro com valores de pH de 6,15, 6,58 e 6,30, respetivamente. Os valores obtidos nas réplicas das determinações têm desvios padrão entre 0,037 e os 0,166.

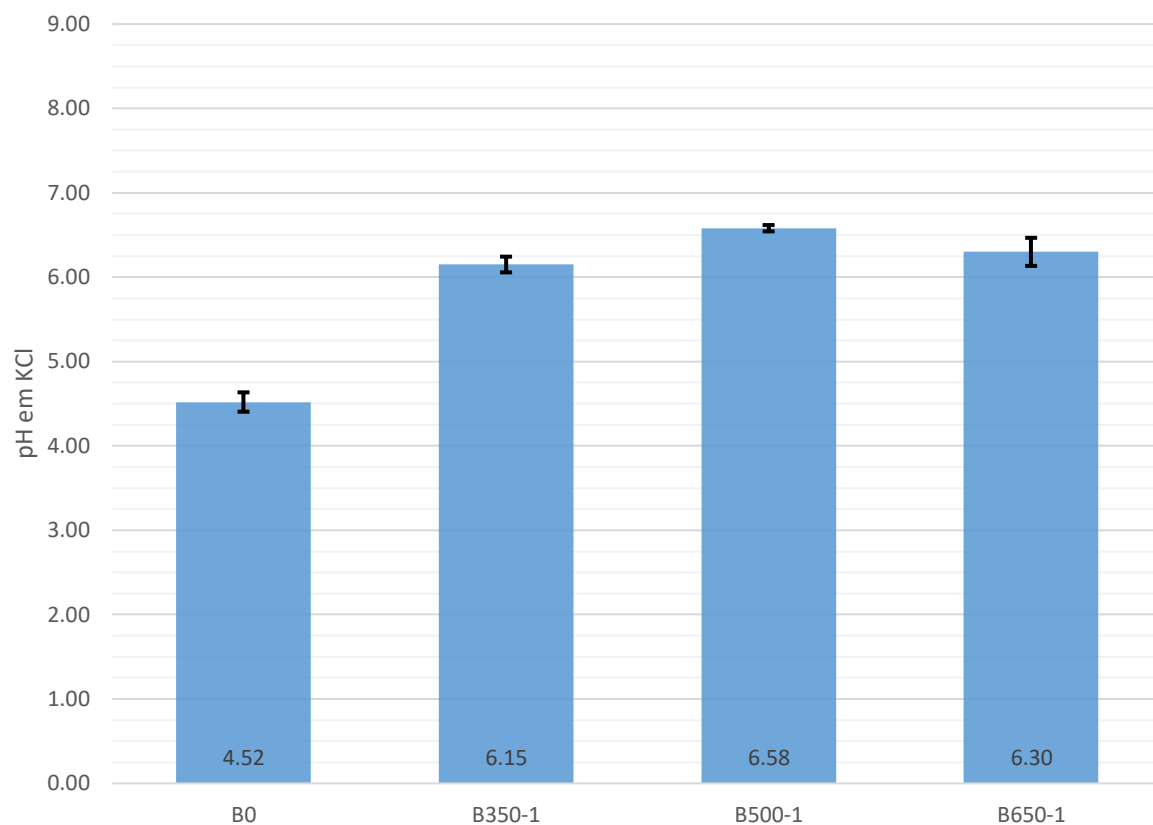


Figura 30. Valores médios de pH em KCl para o solo de Boelhe e respetivo desvio padrão.

Na Figura 31 estão sintetizados os valores médios de pH em KCl obtidos nos solos da Maxieira. O solo original (M0) apresenta pH ácido, em média 5,23 e os solos M350-1, M500-1 e M650-1 apresentam pH básico, com valores de 7,48, 8,33 e 8,5, respetivamente. Os valores do desvio padrão estão entre 0,028 e 0,052.

Tal como no caso do pH em água também o pH em KCl dos solos é afetado pela submissão dos solos ao efeito da temperatura, aumentando-o em ambas os solos estudados, os solos inicialmente ácidos passam com a submissão a temperaturas elevadas a ligeiramente ácido ou neutros no caso do solo de Boelhe e básicos no solo da Maxieira.

Os valores de pH obtidos, tanto em água como em solução de cloreto de potássio, revelam aumento conforme os solos são expostos a diversas temperaturas, o que está em concordância com Certini, (2005).

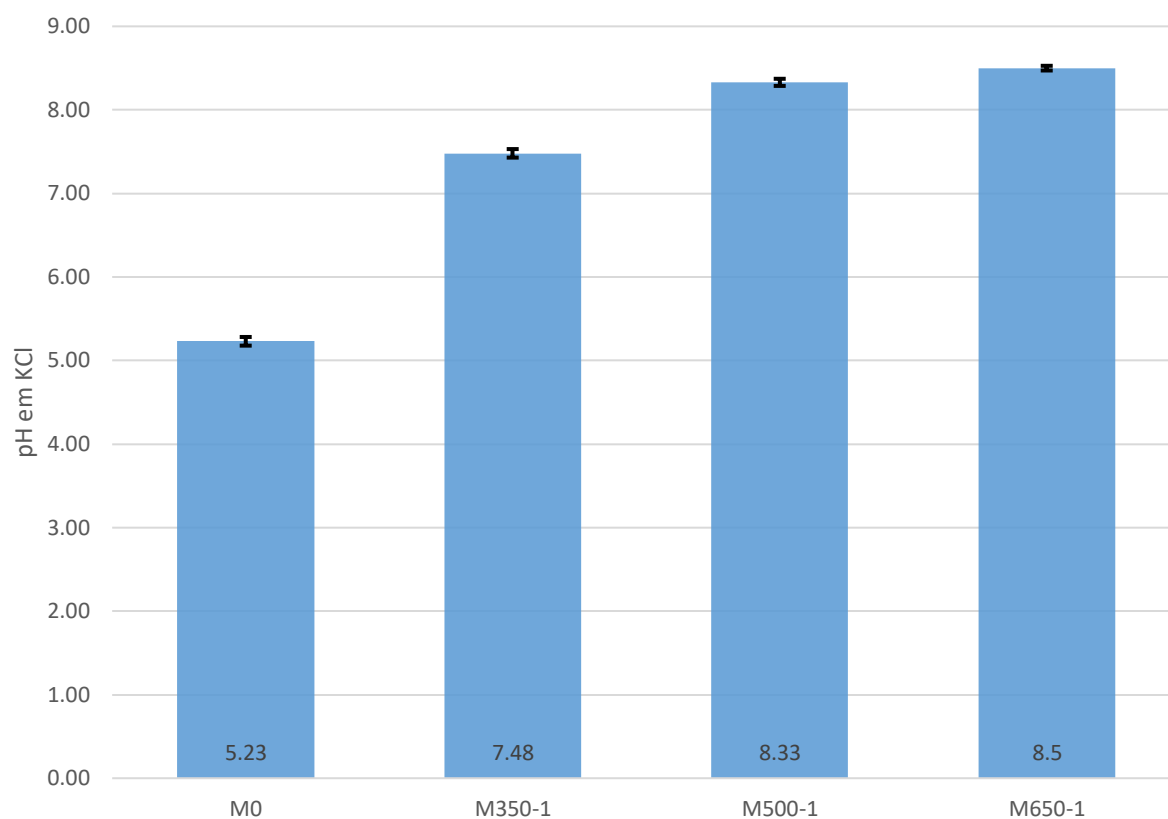


Figura 31. Valores médios de pH em KCl para o solo da Maxieira e respetivo desvio padrão.

#### 4.5. Condutividade Elétrica

Os valores médios da condutividade elétrica obtidos para as amostras dos solos estudados são seguidamente apresentados.

Na Figura 32 os resultados do solo de Boelhe revelam para os solos B0, B350-1, B500-1 e B650-1 condutividade elétrica de 130, 189, 192 e 120  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respetivamente. Podemos também verificar que os valores de desvio padrão calculados variam entre 2 e 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

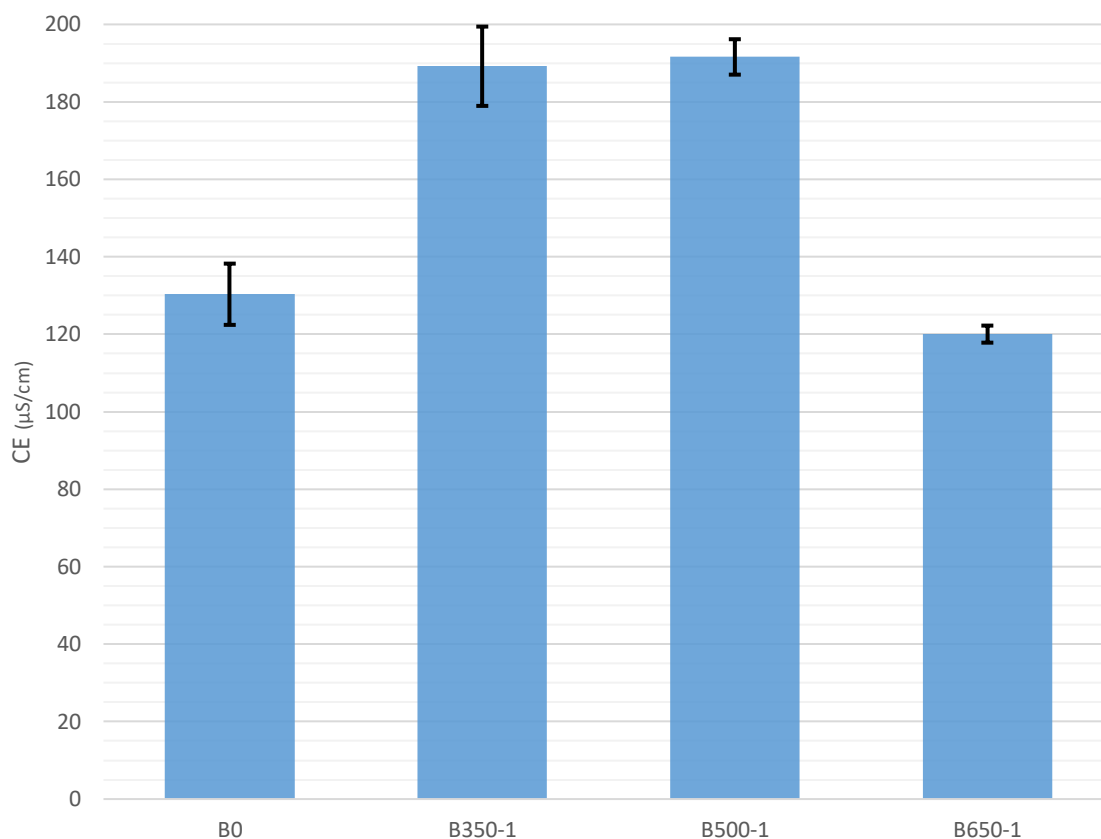


Figura 32. Valores médios de condutividade elétrica para o solo de Boelhe e respetivo desvio padrão.

Na Figura 33 estão representados os valores médios da condutividade elétrica para o solo da Maxieira. O solo original apresenta valor médio de 195  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , que aumenta muito com a submissão do solo a temperaturas elevadas; passando a 595  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para M350-1, 505  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para M500-1 e 539  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para M650-1. Os valores de desvio padrão calculado variam entre 2 e 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

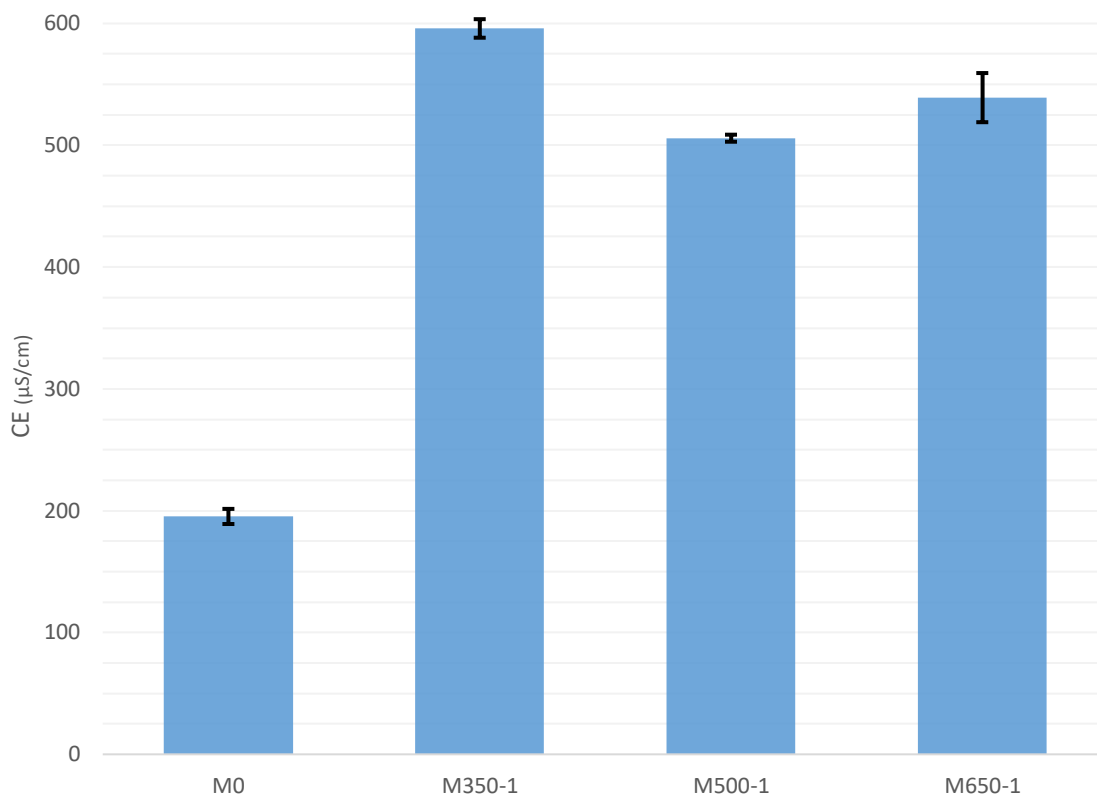


Figura 33: Valores médios de condutividade elétrica para o solo da Maxieira e respetivo desvio padrão.

Comparando os dois solos verifica-se que originalmente apresentam valores diferentes, superior no caso do solo da Maxieira e que, em ambos os casos, a condutividade elétrica sofre a influência da submissão do solo a altas temperaturas, sendo este efeito muito mais evidente no caso do solo da Maxieira.

A bibliografia estudada aponta para um aumento temporário da CE nos solos sujeitos a altas temperaturas, pois ocorre a combustão da MO (Ciampa et al., 2009; Granged et al., 2011; Pereira et al., 2017), os resultados obtidos no presente estudo são compatíveis com esta informação, embora não tenha sido avaliado o comportamento da CE ao longo do tempo verificou-se aumento com a exposição do solo a temperaturas elevadas.

#### 4.6. Teor de Matéria Orgânica

Os valores de teor de matéria orgânica obtidos para as amostras originais (B0 e M0) e as submetidas à temperatura de 350°C (B350-1 e M350-1) foram determinadas e os resultados são seguidamente apresentados.

Na Figura 34 encontra-se a representação gráfica dos resultados obtidos, verificando-se que o teor em matéria orgânica no solo original da Maxieira (15,1%) é muito superior ao teor em matéria orgânica no solo original de Boelhe (5,2%). Relativamente ao efeito da temperatura de 350°C no

teor em matéria orgânica dos solos verifica-se que ocorre diminuição em ambos os solos. No solo de Boelhe ocorre uma perda de 4,5% (cerca de 86,5% relativamente à MO do solo original) e no solo da Maxieira existe uma perda de 12,3% (cerca de 81,5% relativamente à MO do solo original). Visto que o solo de Boelhe é um solo relativamente mais ácido que o da Maxieira, é expectável que o último tenha uma maior presença de matéria orgânica, como se pode constatar. Segundo a bibliografia estudada, a eliminação completa da MO pode ocorrer quando exposta a temperaturas de 300°C ao mais e é influenciada por vários fatores, um deles a severidade do incêndio (González-Pérez et al., 2004). Neste estudo, os resultados obtidos para a MO enquadram-se nesta expectativa.

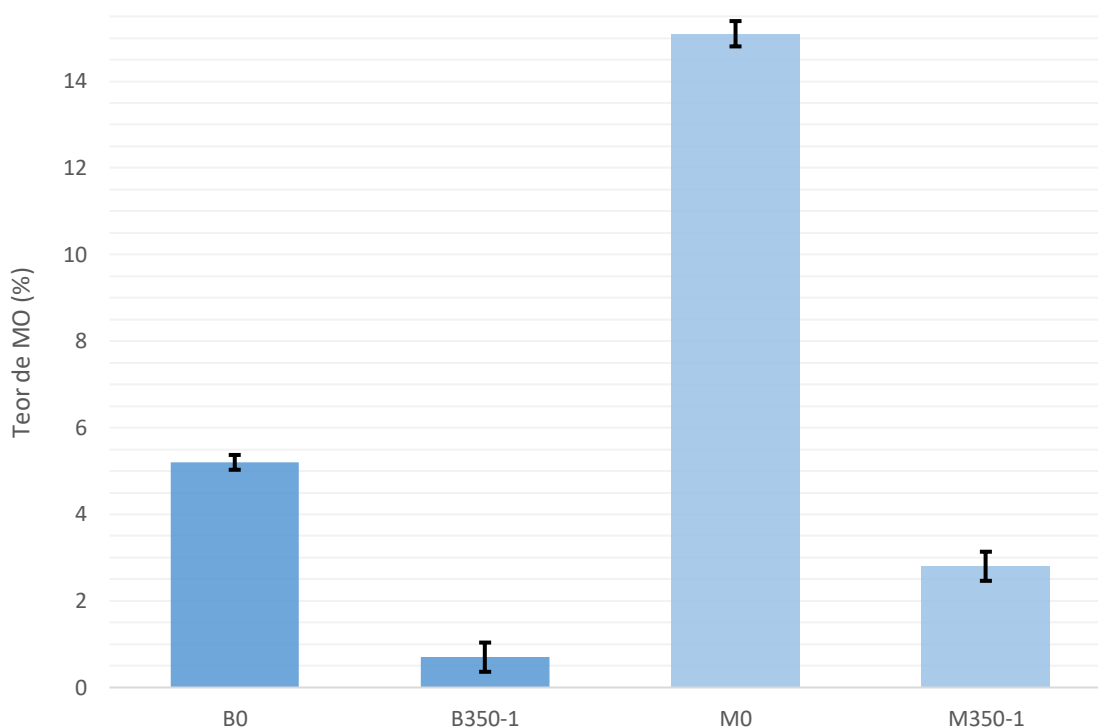


Figura 34. Valores médios obtidos para o teor de matéria orgânica para as amostras originais e as expostas à temperatura de 350°C.

#### 4.7. Densidade Aparente do Solo

Os valores da densidade aparente em amostras remexidas do solo são seguidamente apresentados. Na Figura 35 temos representado graficamente as densidades médias determinadas para o solo de Boelhe, nas amostras original (B0) e nas amostras submetidas às três temperaturas preconizadas. As amostras B0, B350-1, B500-1 e B650-1 apresentam, respetivamente, valores de densidade aparente de 1,29 g/mL, 1,50 g/mL, 1,52 g/mL e 1,47 g/mL. Existe um aumento da densidade aparente comparando os solos sujeitos a temperaturas elevadas com o solo original, sendo o valor máximo atingido no solo submetido a 500°C.

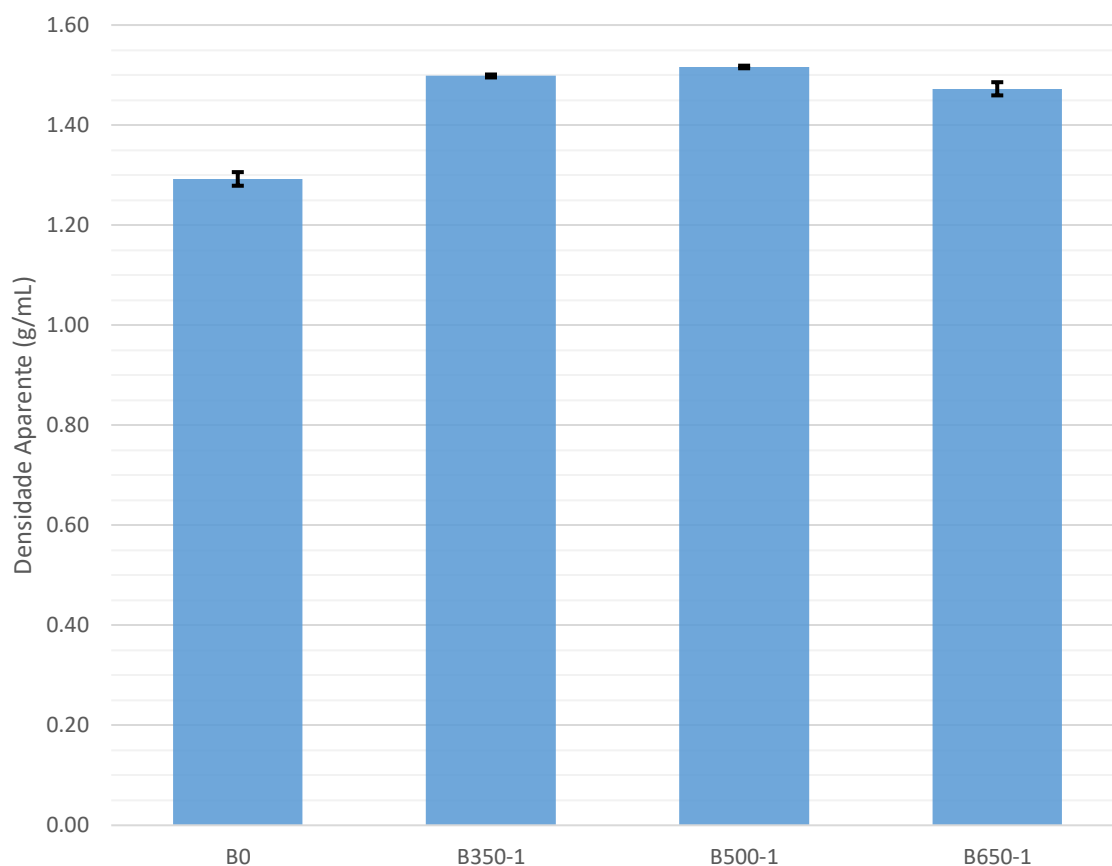


Figura 35. Valores médios obtidos da densidade aparente para as diversas amostras do solo de Boelhe.

No solo da Maxieira (Figura 36) estão apresentadas as densidades aparentes obtidas para o solo da Maxieira. Os valores são inferiores aos de Boelhe o que seria espectável considerando as diferenças granulométricas e a natureza mineralógica deste solo. Os valores obtidos apontam para valores de densidade aparente média 0,99 g/mL para M0, 1,02 g/mL para M350-1 e 0,98 g/mL tanto para M500-1 e M650-1. Temos assim pequenas oscilações nos valores determinados pelo que é possível considerar que, neste caso, não ocorreram alterações devido ao efeito da temperatura no solo.

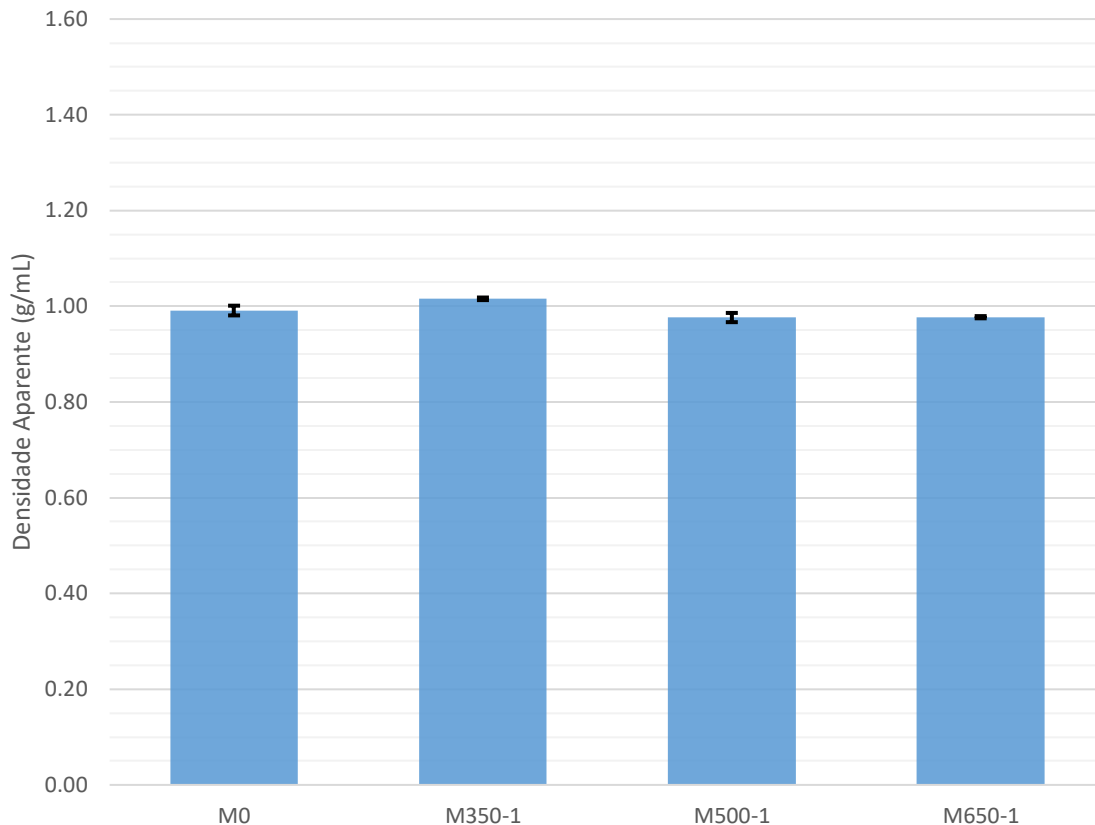


Figura 36. Valores médios obtidos da densidade aparente para as diversas amostras do solo da Maxieira.

Nas Figura 35 e 36 também esta representado o desvio padrão de cada um dos valores determinados para a densidade e este varia entre os 0,00 e os 0,01 g/mL, sendo assim, um desvio padrão com valores muito reduzidos.

Os resultados obtidos para a avaliação da densidade de água encontram-se em conformidade com Certini (2005), que afirma que é usual esta aumentar quando exposta a temperaturas elevadas.

#### 4.8. Capacidade de Retenção de água

Os valores determinados para a capacidade de retenção de água no solo encontram-se seguidamente apresentados.

A Figura 37 é correspondente aos valores médios obtidos para esta propriedade nas amostras do solo de Boelhe, B0 com valor de 0,56 mL/g, B350-1 com 0,44 mL/g, B500-1 com 0,46 mL/g e B650-1 com 0,54 mL/g. A capacidade de retenção de água inicial (B0) diminui quando o solo é exposto a 350°C, aumentando, posteriormente, no caso de solos expostos a 500°C e 650°C aproximando-se muito do valor do solo original. É de salientar que as amostras de solo de Boelhe que apresentaram maior densidade aparente são as que apresentam menor capacidade de retenção da água e, as

---

amostras que apresentaram menor densidade aparente são as que revelam maior capacidade de retenção da água.

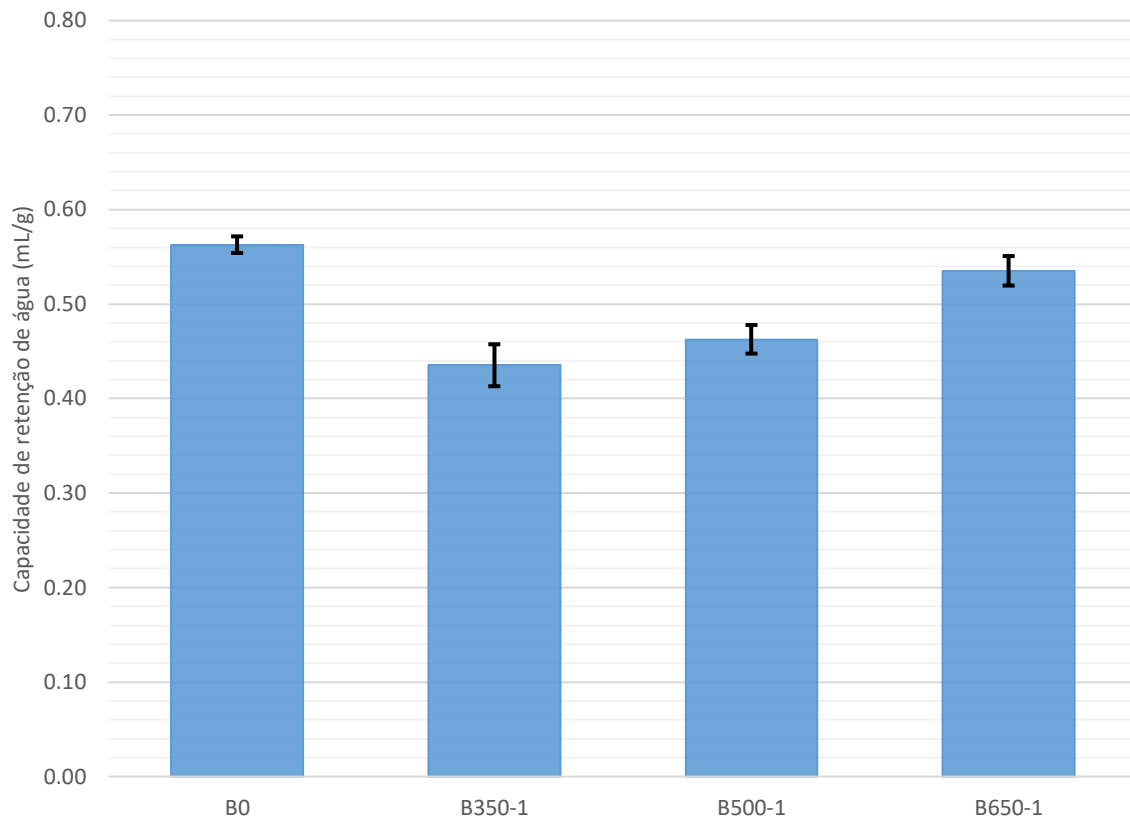


Figura 37. Valores médios obtidos da capacidade de retenção de água para as diversas amostras do solo de Boelhe.

As amostras de solo da Maxieira (Figura 38) apresentam valores de capacidade de retenção de água para M0, M350-1, M500-1 e M650-1 de 0,82 mL/g, 0,73 mL/g, 0,69 mL/g e 0,68 mL/g, respetivamente; podemos verificar que quando expostos a temperaturas elevadas estes solos vêm a sua capacidade de retenção de água reduzida.

O solo de matriz calcária, M, revelou capacidade de retenção de água superior à do solo de matriz granítica, B, o que deverá estar relacionado com a sua densidade aparente superior em B e, também, com a sua granulometria pois a fração de areia mais abundante em B não deverá favorecer a capacidade de retenção de água no solo.

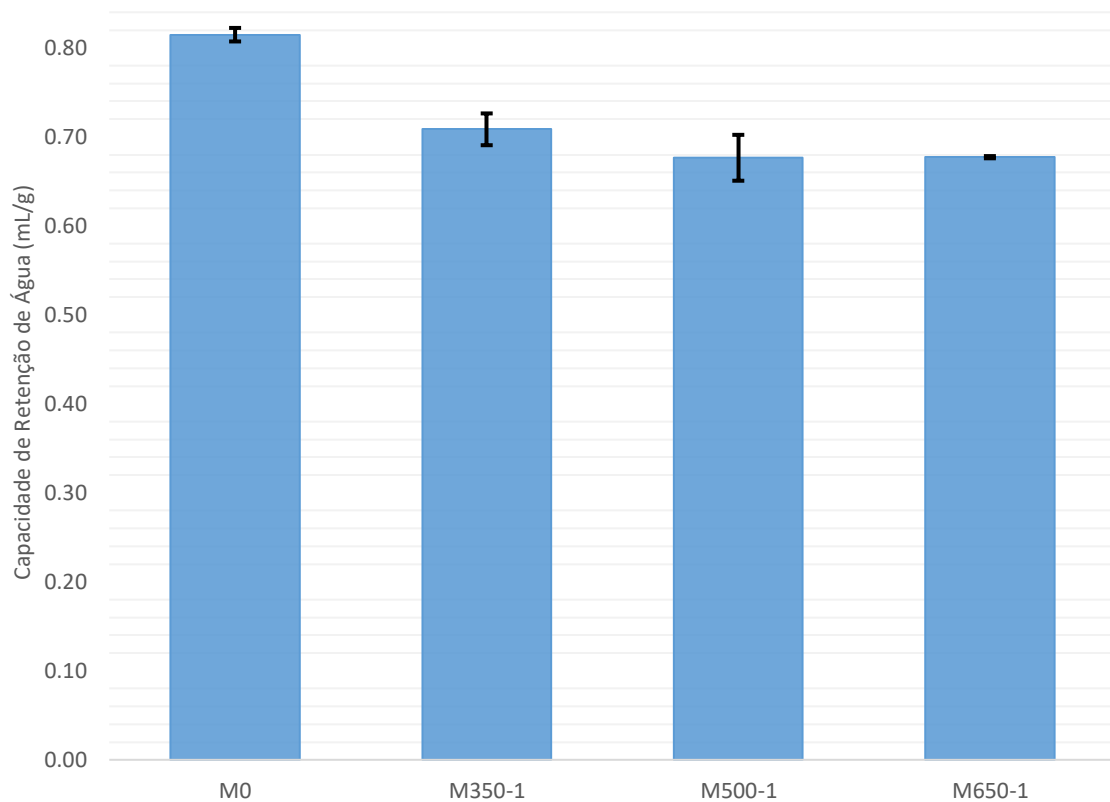


Figura 38. Valores médios obtidos da capacidade de retenção de água para as diversas amostras do solo da Maxieira.

Os valores do desvio padrão associados variam entre 0,00 e 0,03 mL/g.

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Capítulo V**

### **Conclusões**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 5. Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura nas propriedades físico-químicas dos solos, submetendo os solos a diferentes temperaturas (350°C, 500°C e 650°C) durante o mesmo período de contacto de 1h. A submissão das amostras às temperaturas referidas foi executada com recurso a uma mufla, de forma que fosse possível garantir o maior controlo e segurança no processo de se atingir as temperaturas elevadas pré-definidas e desejadas.

A amostragem foi realizada em dois locais distintos, na zona Norte e na zona Centro do país, em ambientes geológicos distintos, tendo sido colhidas amostras remexidas com recurso a pá dos 0 aos 20 cm de profundidade. As amostras obtidas foram submetidas a diversos ensaios de laboratório, designadamente a determinação de: cor, análise granulométrica, análise elementar por fluorescência de raios-X, pH em H<sub>2</sub>O, pH em KCl, condutividade elétrica, teor em matéria orgânica, densidade aparente e capacidade de retenção de água.

Após a avaliação dos resultados obtidos nos ensaios podemos concluir que existem alterações nas propriedades físico-químicas das amostras de solo quando submetidos às temperaturas preconizadas.

No que diz respeito à cor, verificou-se escurecimento do solo aos 350°C, com posterior clareamento progressivo conforme são atingidos os 500°C e os 650°C. O solo da Maxieira apresenta uma tonalidade mais alaranjada que se intensifica com o aumento das temperaturas. Estes resultados estão de acordo com o referido na bibliografia estudada que aponta para escurecimento devido à carbonização a temperaturas não muito altas e alteração para amarelada ou avermelhada devido à formação de óxidos de ferro a médias e altas temperaturas, respetivamente.

Relativamente à granulometria, verifica-se que nos dois solos originais a fração arenosa é predominante. Após as amostras serem expostas às temperaturas pré-definidas, no solo de Boelhe a fração arenosa continua a ser dominante, mas no solo da Maxieira a fração granulométrica que passa a dominar é a siltosa. A temperatura altera mais a granulometria do solo carbonatado, fenómeno que sente logo aos 350°C. No caso do solo da Maxieira, ocorre um aumento progressivo dos siltes até aos 500°C, de 40% para 63% para 72%, seguido de um decréscimo de 17% na amostra M650-1. No solo de matriz granítica ocorre um aumento da fração arenosa, tornando os solos mais grosseiros. Já no solo calcário, devido à presença dos carbonatos, ocorre um aumento da fração siltosa, tornando o solo mais fino que o original. Este aumento da fração siltosa com a temperatura também está previsto na literatura analisada; no entanto, no presente trabalho, como referido, tal só se verificou no solo de natureza carbonatada o que aponta para a influência da natureza mineralógica da matriz neste fenómeno. Também na textura, o efeito da temperatura na é mais

---

notório no solo M, uma vez que no solo B só se verificou alteração textural aos 650°C, enquanto no solo M tal aconteceu logo aos 350°C.

Quanto à análise química elementar por FRX, os resultados revelaram que não existem grandes alterações no que diz respeito à composição elementar dos solos, independentemente da temperatura a que a amostra foi submetida. As variações detetadas não são muito elevadas e poderão ser compatíveis com os erros associados ao método.

Na determinação do pH, os valores, tanto em solução aquosa como solução de cloreto de potássio, sofreram um aumento nos solos expostos às temperaturas preconizadas, o que está em congruência com a bibliografia. O aumento do pH foi na mesma ordem de grandeza em ambos os meios de determinação.

No que refere à condutividade elétrica, verificou-se que em todas as amostras, quer do solo de Boelhe quer no da Maxieira, ocorreu um aumento do seu valor, sendo este muito superior no solo da Maxieira. Os resultados estão de acordo com o que consta na bibliografia estudada.

Relativamente à matéria orgânica, esta só foi determinada para o solo original (B0 e M0) e para os solos submetidos à temperatura de 350°C (B350-1 e M350-1). Os resultados revelaram que nos solos submetidos à temperatura de 350°C ocorreu uma diminuição de 12,3% e 4,5% no teor de matéria orgânica nos solos da Maxieira de Boelhe, respetivamente; o que, relativamente ao valor inicial, corresponde a perdas de 81,5% no caso do solo da Maxieira e de 86,5% no caso do solo de Boelhe. A bibliografia refere que a eliminação da MO pode ocorrer quando atingidas temperaturas iguais ou superiores a 300°C, ainda assim os efeitos da temperatura são muito variáveis para esta propriedade.

Quanto à densidade aparente, já era expectável que o solo de Boelhe apresentasse valores para a densidade aparente superiores aos do solo da Maxieira, devido às diferentes granulometrias e composição mineralógicas expectáveis distintas. Quando submetidos às temperaturas preconizadas notou-se um aumento da densidade aparente do solo B, que no caso do solo M não foi tão notável devido à existência de frações de siltes e argilas com percentagens maiores. Os resultados encontram-se em conformidade com a bibliografia, que nos diz que a densidade aparente aumenta devido ao preenchimento de vazios pelas cinzas e minerais argilosos dispersos e à degradação dos agregados.

Os valores da capacidade de retenção de água revelaram-nos que os solos com menor densidade aparente apresentaram uma capacidade de retenção de água superior aos solos com densidade superior. Assim, e em concordância com o referido, o solo da Maxieira revelou ter uma capacidade de retenção de água superior que o de Boelhe. O solo M revelou que o valor desta propriedade é decrescente conforme o aumento da temperatura, enquanto no solo B os valores mostraram que

---

o solo diminui a sua capacidade de retenção de água até aos 500°C, mas volta a valores aproximados dos originais quando submetido a temperaturas de 650°C.

Como propostas de trabalhos futuros, propõe-se a realização do mesmo tipo de estudo fazendo variar o tempo de contacto, por exemplo, t=3h e/ou t=5h. Desta maneira, será possível perceber se com a mesma temperatura e tempos de contactos diferentes vão ou não ocorrer mudanças significativas nos resultados das propriedades avaliadas neste estudo. Para além do fator tempo, também o fator temperatura poderá ser testado, optando por abranger uma gama de temperatura mais larga, adotando temperaturas inferiores a 350°C e também temperaturas superiores a 650°C. Há, ainda, muitas outras características de podem e devem ser estudadas, designadamente: a composição mineralógica, o teor em carbono orgânico (TOC), microbiologia do solo, teores em azoto e fósforo, bases de troca ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ ) e presença de PAH's, entre outros. O tipo de solo estudado também pode e deve ser estendido a outras rochas mãe não abrangidas por este estudo.

Este tipo de abordagem é essencial na avaliação da variação das características do solo quando submetido a temperaturas elevadas, pois permite estimar se este tem capacidade de sustentar um ecossistema se isto lhe acontecer no local, ou se é necessário intervir com técnicas de recuperação de solos.

---

(página propositadamente em branco)



## **Capítulo VI**

### **Referências Bibliográficas**



---

(página propositadamente em branco)

---

## 6. Referências Bibliográficas

Abrams, M. D., Johnson, E. A., & Miyanishi, K. (2001). Synthesis and Quantification of the Physical Aspects of Fire. *Ecology*, 82(11): 3267.

Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. In *Journal of Forestry Research*, 33(5):1419–1441. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>

Álvaro-Fuentes, J., Lóczy, D., Thiele-Bruhn, S., Zornoza, R. (2019). Handbook of plant and soil analysis for agricultural systems.

Bárcenas-Moreno, G., Baath, E. (2009). Bacterial and fungal growth in soil heated at different temperatures to simulate a range of fire intensities. *Soil Biology and -biochemistry* 41, 2517-2526.

Beek, C. L. van (Christina), & Tóth, Gergely. (2012). Risk assessment methodologies of soil threats in Europe: status and options for harmonization for risks by erosion, compaction, salinization, organic matter decline and landslides. Publications Office of the European Union.

Bot, A., & Benites, J. (2005). The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Soils Bulletin 80.

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürgel-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). AR6 Synthesis Report – Climate Change 2023. IPPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Cerdà, A., & Doerr, S. H. (2008). The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74(3):256–263.

Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*, 143(1):1–10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>

César, P., Guilherme, T., Donagemma, K., Fontana, A., & Geraldés, W. (2017). Manual de métodos de análise de solo. 3ª edição, <https://www.embrapa.br>

Channarayappa, & Biradar, D. P. (2018). Soil Basics, management and rhizosphere engineering for sustainable agriculture. CRC Press, Boca Raton.

---

Ciampa, A., Benedettp, A., Sequi, P., & Valentini, M. (2009). Effects of a fire event on the soil organic matter of a pine forest and a pasture. *Agrochimica*, 53(1): 41–55.

Costa, J. B. (1999). *Caracterização e Constituição do Solo*. Fundação Calouste Gulbenkian.

Cuesta, J. R., & Giraldo, I. O. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo – Estado del Arte. *Cuaderno Activa*, 5(1):59–67.

De Bano, L. F., Beyers, J. L., Brown, J. K., Busse, M. D., Elliot, W. J., Folliott, P. F., Jacoby, G. R., Knoepp, J. D., Landsberg, J. D., Neary, D. G., Reardon, J. R., Rinne, J. N., Robichaud, P. R., Ryan, K. C., Tiedemann, A. R., & Zwolinski, M. J. (2005). *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Soil and Water*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://www.fs.usda.gov/research/treearch/20912>

Directive of the European Parliament and of The Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). (2023). <https://doi.org/10.2777/821504>

EASAC. (2018). Opportunities for soil sustainability in Europe.

Etiégni, L., & Campbell, A. G. (1991). Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology*, 37(2):173–178.

Foster, S., Schultz, B., McCuin, G., Neibling, H., & Shwemaker, G. (2013). *Soil Properties, Part 1 of 3: Physical Characteristics*. University of Nevada, Reno Extension. <https://extension.unr.edu/publication.aspx?PubID=2161>

González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter—a review. *Environment International*, 30(6):855–870.

Govindasamy, P., Mahawer, S. K., & Mowrer, J. (2023). Comparison of Low-Cost Methods for Soil Water Holding Capacity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(2). <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2112216>

Granged, A. J., Zavala, L. M., Jordán, A., & Bárcenas-Moreno, G. (2011). Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: A 3-year study. *Geoderma*, 164( 1–2):85–94.

Guimarães, T. L. B. (2016). *Determinação da cor do solo pela carta de Munsell e por colorimetria*. Universidade de Brasília-UnB (monografia) ([https://bdm.unb.br/bitstream/10483/16494/1/2016\\_ThalitaLuziaGuimaraes\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/16494/1/2016_ThalitaLuziaGuimaraes_tcc.pdf))

ICNF. (2023). 6.º relatório provisório de incêndios rurais emissor direção nacional de gestão do programa de fogos rurais instituto da conservação da natureza e das florestas. <https://www.icnf.pt/api/file/doc/8f3e3cf3cd8993a9>

Intergovernmental Panel of Climate Change. (n.d.). Seasonal snow cover, ice and permafrost. Retrieved September 29, 2023, from [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc\\_far\\_wg\\_II\\_chapter\\_07.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ipcc_far_wg_II_chapter_07.pdf)

---

ISO 10390:2005, (2005). Soil quality - Determination of pH. International Organization for Standardization (ISO), second edition. 7 p.

ISO 11265:1994, (1994). Soil Quality – Determination of specific electrical conductivity.

Jaynes, D. B. (1996). Improved Soil Mapping using Electromagnetic Induction Surveys. In P. C. Robert, R. H. Rust, & W. E. Larson (Eds.), *Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture*.

Jaynes, D. B., Novak, J. M., Moorman, T. B., & Cambardella, C. A. (1995). Estimating Herbicide Partition Coefficients from Electromagnetic Induction Measurements. *Journal of Environmental Quality*. 24(1), 36–41.

Jones, J. (2001). *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press.

Juma, N. G. (2001). *The Pedosphere and Its Dynamics: A System Approach to Soil Science*. Salman Productions.

Karen da Costa da Silveira, A., Gerales Teixeira, W., Coimbra Martins, G., Lobato Rodrigues, M. do R., Bacis Ceddia, M., Demonte Ferraz, R., Fraga da Silva, E., & Santana Macedo, R. (n.d.). Capacidade de Retenção de Água em Amostras de Diferentes Horizontes de Solo na Bacia do Rio Urucu-Amazonas.

Ketterings, Q. M., & Bigham, J. M. (2000). Soil Color as an Indicator of Slash-and-Burn Fire Severity and Soil Fertility in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5):1826–1833.

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5):5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>

Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of Soil Physics*. Principles of Soil Physics. CRC Press.

Lourenço, L., Fernandes, S., Bento-Gonçalves, A., Castro, A., Nunes, A., & Vieira, A. (2011). Causas de incêndio florestais em Portugal continental. Análise estatística da investigação efetuada no último quinquénio (1996 a 2010). <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/>

Lund, E. D., Christy, C. D., & Drummond, P. E. (1972). Practical Applications of Soil Electrical Conductivity Mapping. *Physical Review B*. 6(7):2783–2790.

Margesin, R., Schinner, F. (2005). *Manual for soils analysis - monitoring and assessing soil bioremediation*. Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53). Springer International Publishing

Martin, D. A., & Moody, J. A. (2001). Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Processes*. 15(15):2893–2903.

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.

---

Mattigod, S. V., & Zachara, J. M. (1996). Methods of Soil Analysis Part 3 – Chemical Methods Soil Science Society of America Book Series. Methods of Soil Analysis. 1312–1352.

McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Soil pH and Organic Matter. Nutrient Management, Module 8, 8:1–12.

Montanarella, L. (2010). The impact of soil degradation on soil functioning Europe. [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/events/Conferences/2010/SOIL\\_PUBLICATION\\_2010-04-27\\_v1\\_EGU\\_LAND\\_DEGRADATION\\_TALK.pdf](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/events/Conferences/2010/SOIL_PUBLICATION_2010-04-27_v1_EGU_LAND_DEGRADATION_TALK.pdf)

Montanarella, L., Badraoui, M., Chude, V., Dos Santos Baptista Costa, I., Mamo, T., Yemefack, M., Singh Aulang, M., Yagi, K., Young Hong, S., Vijarnsorn, P., Lin Zhang, G., Arrouays, D., Black, H., Krasilnikov, P., Sobocá, J., Alegre, J., Roberto Henriquez, C., Mendonça-Santos, M. de L., Taboada, M., McKenzie, N. (2015). Status of the world's soil resources: main report. FAO, <https://www.fao.org/documents/card/en?details=c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>

Munsell (2020). Munsell Soil Color Book

Nemes, A. (2023). Encyclopedia of soils in the environment. 2nd edition, Volume 5. <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123485304/encyclopedia-of-soils-in-the-environment>

Pereira, P., Bodi, M. B., Úbeda, X., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Balfour, V., & Woods, S. (2010). Las cenizas en el ecosistema suelo. In: Cerdà A., Jordán-López A. (coords), Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales. p. 349-40.

Pereira, P., Cerdà, A., Martin, D., Úbeda, X., Depellegrin, D., Novara, A., Martínez-Murillo, J. F., Brevik, E. C., Menshov, O., Comino, J. R., & Miesel, J. (2017). Short-term low-severity spring grassland fire impacts on soil extractable elements and soil ratios in Lithuania. *Science of The Total Environment*, 578:469–475.

Pereira, P., Úbeda, X., & Francos, M. (2018). Laboratory fire simulations: plant litter and soils.

Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). Edafología: para la agricultura y el medio ambiente. 830.

Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2006). Propriedades físicas do solo. Departamento de Solos, UFSM. p. 1–18.

SBCS. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>

Smith, J. L., & Doran, J. W. (2015). Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. *Methods for Assessing Soil Quality*, 169-185.

Úbeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., Martin, D. (2009). Effects of fire temperature on the physical and chemical characteristics of the ash from two plots of cork oak. *Land Degradation and Development* 20, 589-609.

---

Ulery, A. L., & Graham, R. C. (1993). Forest Fire Effects on Soil Color and Texture. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1): 135–140.

USDA. (2008). *Soil Quality Indicators Bulk Density*.

USDA. (2018). *Soil Survey Manual: Soil Science Division Staff Agriculture Handbook No. 18*.

USDA. (2019). *Soil Bulk Density Moisture Aeration 2019*.

Verma, S., & Jayakumar, S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical, and biological properties of soil: A review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 2(3):168–176.

Willims, B. G., & Hoey, D. (1987). The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. *Australian Journal of Soil Research*, 25(1), 21-27.

WRB - IUSS. (2014). *World reference base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. FAO.

Zhang, Y., E. Hartemink, A., Huang, J., & Minasny, B. (2023). *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 2nd edition, Volume 4. <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123485304/encyclopedia-of-soils-in-the-environment>