

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Agronómica

Dissertação

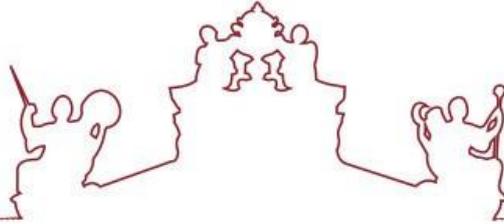
**Utilização de dados do satélite Sentinel-2 e de espectroscopia
NIR para a quantificação de nutrientes na noqueira-comum
(*Juglans regia* L.)**

Maria Beatriz Aresta Pires Mendes

Orientador(es) | Ana Elisa Rato
Adélia Sousa

Évora 2022





Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Agronómica

Dissertação

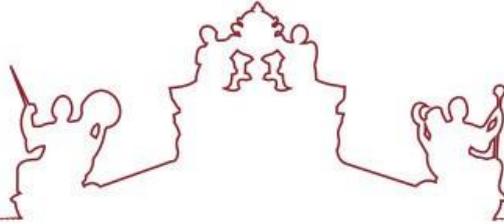
**Utilização de dados do satélite Sentinel-2 e de espectroscopia
NIR para a quantificação de nutrientes na noqueira-comum
(*Juglans regia* L.)**

Maria Beatriz Aresta Pires Mendes

Orientador(es) | Ana Elisa Rato
Adélia Sousa

Évora 2022





A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Vasco Fitas da Cruz (Universidade de Évora)

Vogais | Adélia Sousa (Universidade de Évora) (Orientador)
João Manuel Serrano (Universidade de Évora) (Arguente)

Évora 2022



Agradecimentos

Um sincero agradecimento a todos os que me incentivaram no meu percurso académico na Universidade de Évora e que me motivaram na conclusão desta dissertação de Mestrado.

Às minhas orientadoras, Professora Doutora Ana Elisa Rato e Professora Doutora Adélia de Sousa, pela sua orientação, disponibilidade e conhecimento transmitido para a elaboração desta dissertação. À Professora Doutora Maria do Rosário Félix, pela amizade e carinho e a todos os meus professores da Licenciatura de Agronomia e do Mestrado em Engenharia Agronómica da Universidade de Évora pela excelência da qualidade técnica de cada um.

Uma enorme palavra de agradecimento aos meus pais e irmã, por todo o carinho e apoio que me foi dado, sem o qual não teria conseguido finalizar este estudo. A toda a minha família, em especial ao meu avô e às minhas avós um agradecimento do fundo do coração, por todos os ensinamentos e valores que me transmitiram. Uma palavra especial para o meu namorado, João Maria Pinheiro, pela paciência, pelo apoio e por estar sempre ao meu lado a incentivar-me a atingir todos os meus objetivos.

Um agradecimento aos colegas e aos técnicos do Laboratório de Tecnologia e Pós-Colheita, ao Laboratório de Química Agrícola, ao Laboratório de Nutrição e Metabolismo da Universidade de Évora, por todo o apoio e disponibilidade em auxiliar na análise química das amostras e ao produtor particular que permitiu a recolha das amostras para a concretização deste projeto.

Agradecer também a todos os meus amigos e colegas de curso, em especial à Daniela Farinha, Maria Inês Gafanhoto, Beatriz Piteira, Margarida Borges, Carolina Antão, Ana Rita Silva, Daniela Oliveira, Mariana Pardal e aos meus afilhados de Universidade, Beatriz Correia e Daniel António, pela amizade e incentivo.

Obrigada.

Utilização de dados do satélite Sentinel-2 e de espectroscopia NIR para a quantificação de nutrientes na noqueira-comum (*Juglans regia* L.)

Resumo

A determinação do teor de nutrientes em culturas agrícolas obriga a colheitas periódicas de amostras foliares que serão futuramente analisadas em laboratórios creditados. Desta forma, são disponibilizadas aos agricultores recomendações de fertilização baseadas nos resultados das análises foliares. Este processo é moroso já que desde a recolha das amostras até à obtenção dos resultados podem decorrer algumas semanas. A existência de metodologias alternativas que permitam obter a informação acerca do teor de nutrientes em culturas agrícolas de forma rápida, será uma mais-valia importante na gestão da nutrição vegetal.

Este trabalho tem por objetivo encontrar metodologias para avaliar o nível nutricional (teor de azoto, cálcio e potássio) de um pomar de noqueiras, recorrendo a informações do satélite de observação da Terra, Sentinel-2.

A realização deste trabalho decorreu num pomar de noqueiras, localizado no Alentejo, onde foram recolhidas amostras em diferentes datas. Foram determinados, pelos métodos analíticos de referência, os teores de azoto, cálcio e potássio nas amostras foliares recolhidas e estes valores foram comparados com a informação das bandas espectrais disponibilizados pelo satélite Sentinel-2 e dos índices calculados. Utilizou-se a regressão linear múltipla como técnica estatística para a obtenção de modelos de predição das variáveis resposta (teor de azoto, cálcio e potássio) a partir das variáveis independentes ou preditoras (informação espectral do satélite Sentinel-2).

A utilização dos dados obtidos através da deteção remota possibilitou a construção de modelos relativamente robustos que podem ser utilizados não só para o diagnóstico do estado nutricional, mas como também para criar soluções de gestão da fertilização das culturas.

Palavras-chave: Noqueira; Nutrientes; Deteção remota; FT-NIR; Sentinel-2

Use of Sentinel-2 satellite data and NIR spectroscopy for nutrients quantification in walnut trees (*Juglans regia* L.)

Abstract

The determination of nutrient content in agricultural crops requires periodic collection of leaf samples that will be further analyzed in accredited laboratories. According to the results of foliar analysis, fertilizer recommendations are provided to farmers. This process takes a long time to be completed, usually a few weeks are necessary from sample collection until the final results. The existence of alternative methodologies that will allow to obtain information about the nutrient content of agricultural crops, will be an important step in the management of plant nutrition.

This work aims to find methodologies to assess the nutritional level (nitrogen, calcium and potassium content) of a walnut orchard, using information from the Earth observation satellite, Sentinel-2.

The walnut orchard is, located in Alentejo region and leaf samples were collected at different time points. The levels of nitrogen, calcium and potassium in leaf samples were determined by analytical methods and these values were compared with the information of nine spectral bands and two calculated indices, provided by the satellite Sentinel-2. Multiple linear regression was used as a statistical technique to obtain models for predicting response variables (nitrogen, calcium and potassium content) from independent or predictive variables (spectral information from the Sentinel-2 satellite).

The use of data obtained through remote sensing enabled the construction of relatively robust models that can be used not only for the diagnosis of nutritional status of the walnut trees, but also creating management solutions for crop fertilization.

Keywords: Walnut; Nutrients; Remote sensing; FT-NIR; Sentinel-2

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	II
Abstract.....	III
Índice de equações.....	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de quadros.....	X
Índice de anexos	XII
Lista de siglas	XIII
1. Introdução e Objetivos	1
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Importância da cultura da noqueira no Mundo, em Portugal e no Alentejo.....	3
2.1.1. Origem.....	3
2.1.2. A cultura da noqueira no Mundo.....	3
2.1.3. A cultura da noqueira em Portugal.....	5
2.1.4. A cultura da noqueira no Alentejo.....	6
2.2. Características gerais da noqueira	6
2.2.1. Variedades de noqueiras (mais utilizadas)	11
2.2.2. Nutrição	12
2.2.2.1. Azoto (N).....	13
2.2.2.2. Cálcio (Ca).....	15
2.2.2.3. Potássio (K)	15
2.2.3. Exigências edafoclimáticas.....	16
2.2.3.1. Clima	16
2.2.3.2. Solo.....	18

2.3.	Deteção remota.....	20
2.3.1.	Radiação eletromagnética (REM) e Espectro eletromagnético (EEM).....	22
2.3.2.	Interferência atmosférica	24
2.3.3.	Interferência da radiação eletromagnética (REM) com a superfície terrestre e em particular com a vegetação	25
2.3.4.	Assinaturas espectrais.....	26
2.3.5.	Sensores óticos multiespectrais	28
2.3.6.	Índice espectral de vegetação	29
2.3.7.	Programa <i>Copernicus</i>	32
2.3.7.1.	Satélite Sentinel-2.....	33
2.4.	Espectroscopia de infravermelho próximo.....	35
2.4.1.	História	35
2.4.2.	Descrição da tecnologia.....	35
2.4.3.	Equipamento.....	37
2.4.4.	Equipamento espectrómetro NIR com Transformada de <i>Fourier</i> (FT-NIR)	38
2.5.	Enquadramento da temática abordada neste trabalho.....	38
3.	Materiais e Métodos	41
3.1.	Caracterização do local em estudo	41
3.2.	Caracterização climática do local em estudo.....	42
3.3.	Caracterização edáfica do local em estudo.....	45
3.4.	Caracterização do pomar do local em estudo	47
3.5.	Imagens do satélite Sentinel-2.....	50
3.6.	Seleção dos pontos de amostragem	50
3.7.	Recolha de amostras	52
3.8.	Recolha de espectros	52
3.9.	Determinação do teor de azoto presente nas folhas.....	53

3.10.	Determinação do teor de cálcio e de potássio presente nas folhas	54
3.10.1.	Digestão ácida.....	54
3.11.	Procedimento para a obtenção do modelo final com base nos dados do satélite Sentinel-2	55
4.	Resultados e Discussão	57
4.1.	Determinação do azoto, cálcio e potássio no material vegetal através da espectroscopia FT-NIR	57
4.2.	Determinação da importância relativa das diferentes variáveis em estudo	65
4.3.	Obtenção dos modelos para a determinação dos níveis de nutrientes na cultura	66
4.4.	Aplicação dos modelos obtidos para a obtenção dos mapas de distribuição espacial dos nutrientes	71
5.	Conclusões	74
6.	Referências bibliográficas	76
7.	Anexos.....	85

Índice de equações

Equação 1 - Equação da interação da energia incidente com a superfície terrestre.	26
Equação 2 - Equação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index).	30
Equação 3 - Equação do índice de água por diferença normalizada (NDWI, Normalized Difference Water Index).	32

Índice de figuras

Figura 1 - Evolução da produção total mundial (t/ano) de miolo de noz (Adaptado de: INC, 2019).....	4
Figura 2 - Evolução das exportações mundiais (t/ano) de miolo de noz (Adaptado de: INC, 2019).....	4
Figura 3 - Processo de Detecção Remota (Canada Centre for Remote Sensing, n.d.).....	20
Figura 4 - Radiação eletromagnética (Adaptado de: Quin, 2019).....	22
Figura 5 - Espectro eletromagnético (Grimm, 2006).....	23
Figura 6 - Interação da radiação eletromagnética com a planta (DronEng, 2018).	26
Figura 7 - Comportamento espectral das folhas (Steffen, 1999).....	27
Figura 8 - Curvas da refletância espectral típicas da vegetação e do solo exposto (DronEng, 2018).....	28
Figura 9 - Ilustração do comportamento do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Adaptado de: National Aeronautics and Space Administration, 2000).....	31
Figura 10 - Satélite Sentinel-2 (European Space Agency, 2015b).	33
Figura 11 - Sobretons (sobreposições) e combinações de bandas na área espectral do NIR (Adaptado de: Metrohm, 2006).	37
Figura 12 - Configuração básica de um espectrómetro.	37
Figura 13 - Equipamento espectrómetro NIR com Transformada de Fourier modelo MPA – Bruker Optik GmbH, Germany.	38
Figura 14 - Localização da exploração na região do Alentejo (ArcGIS Desktop, versão 10.6).....	41
Figura 15 - Localização do pomar de nogueiras em estudo (linha verde) sobre uma imagem de satélite (RGB no visível) disponível no Basemap do programa ArcGIS Desktop versão 10.6.	42
Figura 16 - Classificação climática segundo Köppen, em Portugal Continental (Adaptado de: Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2021).	43
Figura 17 - Gráfico termopluviométrico de 1971-2000, da Estação Meteorológica de Évora. (MRR – Média Precipitação Total MTT – Média da Temperatura Média).....	44
Figura 18 - Mapa da distribuição do número de horas de frio entre outubro-abril em Portugal Continental (Mendes, 1983).....	45

Figura 19 - Delimitação da exploração na carta de solos.	47
Figura 20 - Localização das variedades de noqueiras no pomar em estudo (linhas de cores por variedade) sobre uma imagem de satélite (RGB no visível) disponível no Basemap do programa ArcGIS Desktop versão 10.6.....	48
Figura 21 - Pontos de amostragem da data de 4 de maio de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).	51
Figura 22 - Metodologia para a determinação do azoto presente nas folhas.....	53
Figura 23 - Metodologia para a determinação do cálcio e do potássio presente nas folhas.	54
Figura 24 - Reta de calibração obtida pelo modelo PLSR para a previsão dos níveis de azoto na matéria seca das folhas (Opus, versão 7.5).	58
Figura 25 - Reta de calibração obtida pelo modelo PLSR para a previsão dos níveis de cálcio na matéria seca das folhas (Opus, versão 7.5).	60
Figura 26 - Reta de calibração obtida pelo modelo PLSR para a previsão dos níveis de potássio na matéria seca das folhas (Opus, versão 7.5).....	62
Figura 27 - Projeção integral do conjunto de dados considerando as duas componentes principais (PC-1 e PC-2). As variáveis que se encontram no espaço entre as duas elipses contribuem entre 50 a 100% para a variabilidade do modelo (Unscrambler X, versão 10.5.1).....	66
Figura 28 - Correlação dos valores de azoto nas folhas preditos pelo modelo e determinados pelo método de referência (Unscrambler X, versão 10.5.1).	67
Figura 29 - Correlação dos valores de cálcio nas folhas preditos pelo modelo e determinados pelo método de referência (Unscrambler X, versão 10.5.1).	68
Figura 30 - Correlação dos valores de potássio nas folhas preditos pelo modelo e determinados pelo método de referência (Unscrambler X, versão 10.5.1).	70
Figura 31 - Mapa de distribuição espacial do azoto de dia 13 de julho de 2021 com base no modelo obtido para o azoto (ArcGIS Desktop, versão 10.6).....	72
Figura 32 - Mapa de distribuição espacial do cálcio de dia 13 de julho de 2021 com base no modelo obtido para o cálcio (ArcGIS Desktop, versão 10.6).....	72
Figura 33 - Mapa de distribuição espacial do potássio de dia 13 de julho de 2021 com base no modelo obtido para o potássio (ArcGIS Desktop, versão 10.6).	73

Índice de quadros

Quadro 1 - Estados fenológicos da noqueira (flor masculina) (Adaptado de: Iannamico, 2009).....	9
Quadro 2 - Estados fenológicos da noqueira (flor feminina) (Adaptado de: Iannamico, 2009).....	10
Quadro 3 - Zonas do espectro eletromagnético mais utilizadas em deteção remota para estudos da superfície terrestre (Adaptado de: Sousa & Silva, 2017).....	24
Quadro 4 - Bandas espectrais e resolução espacial do satélite Sentinel-2 MSI.	34
Quadro 5 - Número de dias de geada mensais (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2021).....	44
Quadro 6 - Número de pontos de amostragem observados em cada variedade, por data.	51
Quadro 7 - Datas das imagens de satélite e da recolha de amostras.....	52
Quadro 8 - Parâmetros estatísticos dos modelos de calibração e validação obtidos através do programa Opus versão 7.5 (Bruker Optik GmbH, Germany) para a determinação do azoto na matéria seca das folhas.....	59
Quadro 9 - Parâmetros estatísticos dos modelos de calibração e validação obtidos através do programa Opus versão 7.5 (Bruker Optik GmbH, Germany) para a determinação do cálcio na matéria seca das folhas.....	61
Quadro 10 - Parâmetros estatísticos dos modelos de calibração e validação obtidos através do programa Opus versão 7.5 (Bruker Optik GmbH, Germany) para a determinação do potássio na matéria seca das folhas.	63
Quadro 11 – Valor médio, desvio padrão e intervalo de valores do teor de nutrientes em percentagem (N, Ca, K) nas folhas de noqueira.	64
Quadro 12 - Parâmetros estatísticos dos modelos de predição e validação obtidos através do programa Unscrambler X versão 10.5.1 para a determinação do azoto na matéria seca das folhas.	68
Quadro 13 - Parâmetros estatísticos dos modelos de predição e validação obtidos através do programa Unscrambler X versão 10.5.1 para a determinação do cálcio na matéria seca das folhas.	69

Quadro 14 - Parâmetros estatísticos dos modelos de predição e validação obtidos através do programa Unscrambler X versão 10.5.1 para a determinação do potássio na matéria seca das folhas. 71

Índice de anexos

Anexo I - Pontos de amostragem da data de 3 de junho de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).	85
Anexo II - Pontos de amostragem da data de 23 de junho de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).	86
Anexo III - Pontos de amostragem da data de 23 de julho de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).	87
Anexo IV - Pontos de amostragem da data de 12 de agosto de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).	88
Anexo V - Pontos de amostragem da data de 21 de setembro de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).	89
Anexo VI - Quadro da ANOVA do modelo do azoto (Unscrambler X, versão 10.5.1). ..	90
Anexo VII - Quadro da ANOVA do modelo do cálcio (Unscrambler X, versão 10.5.1).	91
Anexo VIII - Quadro da ANOVA do modelo do potássio (Unscrambler X, versão 10.5.1).	92

Lista de siglas

Csa – Clima temperado com verão seco e quente

DP – Desvio Padrão

DR – Detecção Remota

EA – Energia Absorvida

EEM – Espectro Eletromagnético

EI – Energia Incidente

ER – Energia Refletida

ESA – *European Space Agency*

ET – Energia Transmitida

EUA – Estados Unidos da América

FAR – *Far Infrared*

FT-NIR – Equipamento NIR com Transformada de *Fourier*

IV – Infravermelho

IVM – Infravermelho Médio

IVP – Infravermelho Próximo

IVs – Índices Espectrais de Vegetação

IVT – Infravermelho Térmico

Kc – Coeficiente cultural

λ – Comprimento de onda

log – Logaritmo

MIR – *Middle Infrared*

MLR – *Multiple Linear Regression*

MPA – *Multi Purpose Analyzer*

NDMI – *Normalized Difference Moisture Index*

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*

NDWI – *Normalized Difference Water Index*

NIR – *Near Infrared*

PC – *Principal Component*

PCA – *Principal Component Analysis*

pH – Potência de hidrogénio

PLSR – *Partial Least Squares Regression*

R – Refletância

R² – Coeficiente de determinação

REM – Radiação Eletromagnética

RMSE – *Root Mean Squared Error*

RPD – *Residual Prediction Deviation*

SI – Sistema Internacional

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

UV – Ultravioleta

V – Vermelho

VIS – Visível

1. Introdução e Objetivos

A fileira dos frutos secos em Portugal, já tem relevância em termos de economia nacional e a região do Alentejo não é exceção, pois é nesta zona onde se preveem aumentos significativos, devido aos novos investimentos realizados nesta mesma região.

De entre as culturas dos frutos secos presentes em Portugal, a noqueira surge na lista das culturas emergentes, com o aparecimento de pomares jovens e bem conduzidos. No entanto, ainda há pouco conhecimento sobre esta cultura, porém o dinamismo alentejano tem contribuído para a sua expansão, o que é importante visto se estar a competir com um mercado competitivo e forte.

Embora o mercado da noz seja bastante promissor, devido ao crescimento do consumo diário deste fruto, estimulado pelos benefícios à saúde e aliado ao alto valor pago por ele, esta cultura é bastante exigente em vários fatores, pelo que o uso de dados obtidos por deteção remota pode trazer inúmeros benefícios ao desenvolvimento e gestão da cultura.

O recurso aos dados obtidos por deteção remota na agricultura é atualmente uma área crescente, devido à possibilidade da interação e tomada de decisão por meio de imagens e programas computacionais, tornando-a assim numa ferramenta com elevado potencial para a agricultura. A deteção remota em agricultura permite obter informação detalhada sobre o coberto vegetal, por exemplo, sendo utilizada para diversas atividades como: estimativas de produção; avaliação do estado nutricional e hídrico das plantas; deteção de pragas, doenças, falhas na rega ou na adubação, entre muitas outras.

Deste modo, esta tecnologia aplicada na agricultura, permite avaliar grandes áreas num curto espaço de tempo, tornando possível tomar decisões mais assertivas em prol de uma melhor produtividade.

Este trabalho tem como objetivo encontrar metodologias para avaliar o estado nutricional de pomares de noqueiras, utilizando dados de deteção remota (Sentinel-2), a fim de mapear o estado nutricional da cultura, para superar as deficiências nutricionais do pomar. No final deste trabalho optou-se por validar os modelos obtidos e com base na informação espectral do satélite Sentinel-2 produziram-se os mapas de distribuição dos nutrientes em estudo.

A utilização dos dados de deteção remota para produção de mapas com a distribuição espacial dos nutrientes ao nível da cultura permitirá a gestão da fertilização com menor

impacte ambiental, fazendo, quando possível, uma aplicação diferenciada dos nutrientes à cultura.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Importância da cultura da noqueira no Mundo, em Portugal e no Alentejo

2.1.1. Origem

Existem várias propostas sobre a origem da noqueira (*Juglans regia* L.), porém o mais aceite é que a noqueira é originária da Ásia Central, numa área que se estende entre a Turquia e a cadeia montanhosa dos Himalaias, com centro de origem provável no Irão. No século III a.C. esta foi disseminada pelos gregos, desde o Irão até à Europa, onde a partir daí terá sido dispersa por toda a Europa e posteriormente para a América.

2.1.2. A cultura da noqueira no Mundo

A cultura da noqueira encontra-se atualmente dispersa por todos os continentes, embora com maior incidência no Hemisfério Norte. Porém, esta cultura também se encontra presente no Hemisfério Sul, onde se destaque o caso particular do Chile, que se apresenta como um grande produtor, com grande disponibilidade de solos e água de rega, e são capazes de produzir nozes na contra estação fazendo chegar à Europa nozes frescas e de alta qualidade (Almeida, 2017).

Segundo Almeida (2020), a capacidade de produção mundial de noz caracteriza-se fundamentalmente por dois grandes elementos representativos: a China, o maior produtor mundial, cuja maior fração da produção é remetida ao consumo interno, apresentando contudo, um nível de exportações que tem vindo a aumentar, e por outro lado, a oferta do mercado mundial concentrada nos Estados Unidos da América (EUA). Devido essencialmente a estes dois países, a produção mundial de miolo de noz registou um aumento sistemático nos últimos anos, como se constata na figura 1. Deste modo, o grupo dos principais países produtores é liderado pela China, seguindo-se-lhe os EUA e o Chile, representando no seu conjunto mais de 2/3 da produção mundial.

Estima-se que este aumento da produção mundial esteja relacionado com o reconhecimento do valor nutritivo da semente da noz, assim como das novas utilizações, como a incorporação em produtos alimentares transformados, e em produtos de saúde e beleza.

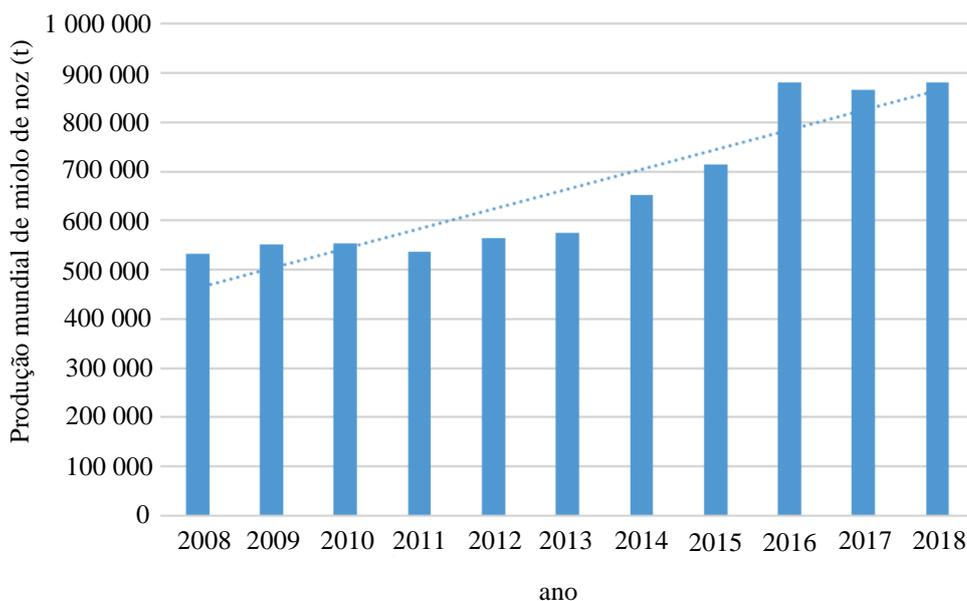


Figura 1 - Evolução da produção total mundial (t/ano) de miolo de noz (Adaptado de: INC, 2019).

No que diz respeito ao consumo deste fruto, os principais países consumidores são os EUA, Irão, França e Japão. É de salientar que os EUA, o Chile, o Irão e a Ucrânia são os países que atingem níveis de produção superiores aos do consumo, assumindo-se assim como exportadores líquidos de noz. Em contrapartida, a China, a França, o Japão e a Alemanha representam-se como potenciais importadores. Desta forma, a quantidade de noz que é alvo de exportação apresenta uma tendência crescente tendo, em 2017, atingindo um valor de cerca de 1/4 do valor da produção, com a exportação de 238040 t. Esta tendência traduziu-se num aumento de 110% em termos médios desde 2007 (Figura 2) (Almeida, 2020).

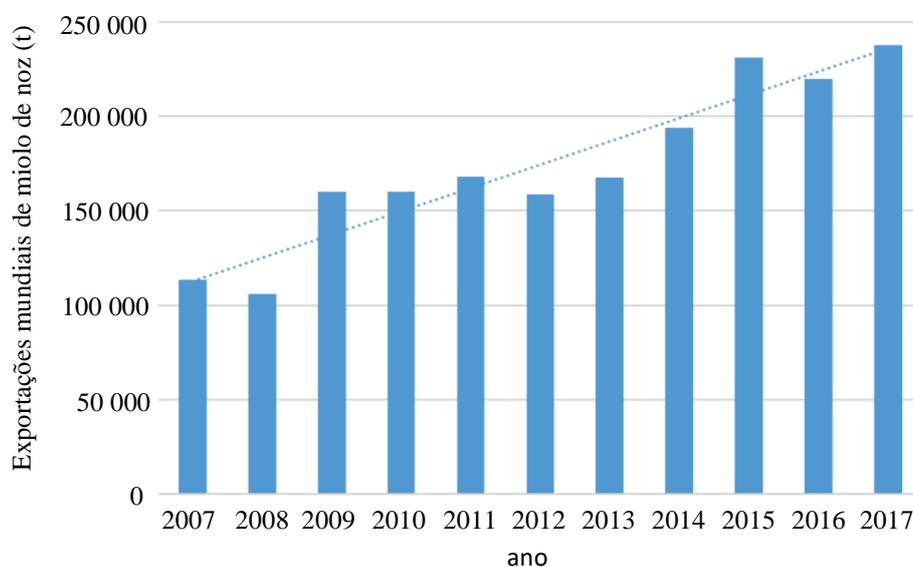


Figura 2 - Evolução das exportações mundiais (t/ano) de miolo de noz (Adaptado de: INC, 2019).

Logo, e atendendo a que as áreas de produção assinalaram um aumento nos últimos anos, considera-se assim que a tendência de crescimento do mercado irá prevalecer.

2.1.3. A cultura da noqueira em Portugal

Em Portugal, foram contabilizadas 400000 árvores de noqueira na região do Centro e em Trás-os-Montes (Pereira, 1990). Entre os anos de 1986 e 1998, verificou-se em Portugal Continental um acréscimo das plantações de noqueira, tendo a área aumentado de 1400 para 2143 ha. Em 1999, foi quando ocorreu o maior investimento nas plantações desta cultura, com a superfície a atingir os 3063 ha. A área de noqueiras totalizava 3167 ha em 2005, com uma produção associada de 4167 t e uma produtividade média de cerca de 1,3 t/ha. Esta cultura, em Portugal, encontra-se como árvore espalhada por todo o país. Sendo que, os pomares assumem uma maior relevância nas regiões de Trás-os-Montes, Beira Litoral, Alentejo, Ribatejo e Oeste (Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 2007).

Assim sendo, segundo o Instituto Nacional de Estatística (2018), na produção de árvores de frutos secos a noqueira ocupa o terceiro lugar, com uma expressão aproximadamente de 5% da área plantada com árvores de frutos secos (frutos de casca rija), com uma superfície de 3851 ha e uma produção associada de 4750 t. No entanto, é de salientar que a área de plantação tem vindo a aumentar significativamente nos últimos anos em Portugal.

A produção de noz em Portugal verifica-se principalmente no território continental, tendo pouca expressão a sua produção nas regiões autónomas da Madeira e dos Açores. Em termos globais a produção de noz em Portugal é aproximadamente 4000 t, sendo que existe evidência de uma tendência crescente nos últimos anos.

Portugal é um país evidentemente importador, sendo que existe margem para aumentar a produção nacional, desde que esta seja competitiva com os países de onde atualmente importamos. As importações portuguesas de noz com casca, oriunda de países europeus, apresentam um perfil decrescente nos últimos três anos, com um valor a rondar as 1000 t em 2018. Neste caso, Portugal importa sobretudo de França e de Espanha, seguindo-se a Roménia em menor escala. Quanto às exportações portuguesas de noz para países exteriores ao espaço europeu, embora em quantidades relativamente baixas, apresentam uma tendência crescente. Em termos do destino das exportações contamos essencialmente com a Turquia e Marrocos.

2.1.4. A cultura da noqueira no Alentejo

Em 2005, o Alentejo era a terceira região com maior peso na produção de noz, pois apesar de ter uma das menores superfícies plantadas, era uma das regiões onde os pomares atingiam melhores produtividades.

Atualmente, o Alentejo é uma das regiões onde se encontram alguns pomares que são explorados de uma forma tecnologicamente mais evoluída e onde se verifica uma evolução da área plantada, começando esta a ter expressão nos valores de produção nacional, sendo uma das principais zonas produtoras deste fruto (Almeida, 2020). Supõem-se que a construção do maior reservatório de água artificial da Europa, o Alqueva, seja um dos fatores que esteja relacionado com o aumento da superfície plantada de noqueiras no Alentejo, pois este contribui não só para a uniformidade das disponibilidades hídricas, mas também para que as áreas passem a ser bastantes competitivas, permitindo assim uma melhor gestão da utilização da água nos locais mais carenciados. É nesta região, em particular nos concelhos de Estremoz e Arraiolos, que se obtêm as maiores produtividades do país, devido à natureza dos pomares, na sua maioria bem implantados e com técnicas de condução bem adequadas (Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 2007).

De acordo com o Instituto Nacional de Estatística (2018), o Alentejo tem uma superfície estimada de 1507 ha e com uma produção associada de 2257 t.

2.2. Características gerais da noqueira

A noqueira (*Juglans regia* L.) pertence à família Juglandaceae, género *Juglans*.

É também conhecida como noqueira Inglesa, persa ou comum, é o membro do género *Juglans* com maior relevância a nível económico, devido tanto ao fruto que produz como pela qualidade da madeira, sendo cultivada em regiões de clima temperado (Bayazit *et al.*, 2007).

O género *Juglans* encontra-se dividido em 4 secções taxonómicas: *Cardiocaryon* Dode; *Trachycaryon* Dode; *Rhysocaryon* Dode e *Dioscaryon* Dode ou *Juglans*, com uma única espécie, a *Juglans regia* L.. Esta divisão assentou fundamentalmente na morfologia do

fruto, na forma das folhas e no tipo de madeira (Manning, 1978 citado por Fjellstrom & Parfitt, 1994).

Em termos morfológicos é uma árvore de folha caduca, muito vigorosa e de grande dimensão podendo mesmo alcançar os 25-30 m de altura, e o tronco pode atingir os 3-4 m de diâmetro, sendo a sua madeira considerada de excelente qualidade. Dado esse motivo é uma espécie que, para além de ser cultivada pelo seu fruto, é também cultivada como espécie florestal. É descrita por possuir um sistema radicular muito desenvolvido, composto por uma raiz principal pivotante a qual pode atingir grandes profundidades.

A copa da noqueira é abaulada e ampla, comprimida com tronco direito, em que a madeira apresenta uma tonalidade acinzentada e grossa. Quanto aos ramos novos, estes são lisos e de cor avermelhada escura, exibindo os ramos mais velhos tonalidades acinzentadas (Robledo, 1981).

A noqueira tem folhas compostas de 5 a 17 folíolos, de forma lanceolada, de cor verde opaca, com 6 a 12 cm de comprimento e 3 a 6 cm de largura, sendo que os bordos podem ser lisos ou serrados. Relativamente aos gomos, estes são ovais abaulados, o seu tamanho é variável e são cobertos por duas escamas no exterior que os envolvem praticamente na totalidade, sendo os gomos terminais eretos e os laterais latentes. Tanto os gomos terminais, como os gomos laterais encontram-se situados sobre uma cicatriz foliar.

Conforme descrito por Germain *et al.* (1999) citado por Bernard *et al.* (2017), as noqueiras são plantas monoicas, dicogamicas e a polinização é anemófila, o que significa que são polinizadas através do vento.

Embora, a noqueira seja geralmente autocompatível, isto é, as flores femininas de uma árvore ou cultivar podem ser fecundadas pelo pólen da mesma árvore (Palomares, 2008), a polinização da noqueira é em geral cruzada devido ao fenómeno de dicogamia. Este fenómeno caracteriza-se pelo desfasamento temporal das florações masculina e feminina, sendo mais frequente a ocorrência da floração masculina antes da feminina (protandria), ainda que algumas cultivares exibam o fenómeno contrário (protoginia). A simultaneidade das florações masculina e feminina (alogamia) é relativamente rara. As condições ambientais mais amenas (zonas ou regiões menos frias durante o inverno) tendem a agravar a dicogamia, enquanto o contrário ocorre nas regiões mais frias (Almeida, 2017).

Deste modo, para garantir o sucesso da polinização no pomar de noqueiras (noqueiral), visto que, a autofertilização é limitada devido à dicogamia, é necessário incluir um genótipo polinizador nos pomares que seja adequado, isto é, com a floração masculina coincidente com a floração feminina da cultivar principal. É de salientar que em muitos casos, o período de floração feminina não é totalmente coberto pela floração masculina de uma única cultivar, sendo necessárias duas ou mesmo três cultivares polinizadoras.

Uma inadequada escolha ou distribuição das polinizadoras pode ser um fator importante para o insucesso da polinização por falta de pólen no momento em que as flores femininas estão recetivas. Deste forma, as polinizadoras devem ser em número adequado e tendo em conta os ventos dominantes (Iannamico, 2015).

Para López *et al.* (2014) os primórdios das inflorescências masculinas, os amentilhos, formam-se durante a estação de crescimento e estão visíveis nos ramos durante o período de repouso invernal, retomando o desenvolvimento na primavera até à plena maturação dos órgãos florais e libertação do pólen. Quanto às flores femininas, estas aparecem nos crescimentos jovens do ano, normalmente na extremidade, em posição apical. Os gomos que dão origem aos crescimentos do ano e à frutificação aparecem nos ramos do ano anterior, apenas um ou em número reduzido em posição apical (terminal) ou subapical, ou então em número elevado, em posição axilar, distribuídos ao longo do ramo.

Quanto ao ciclo vegetativo anual, a noqueira tem o período de repouso invernal e o período de atividade vegetativa. O repouso invernal alberga o período entre a queda das folhas (paragem vegetativo outonal) até ao início da atividade vegetativa no fim do inverno. Enquanto o período de atividade vegetativa começa no fim do inverno, com os primeiros sinais de atividade até à queda das folhas, é nesta fase que se diferenciam os vários órgãos da árvore, fase esta que se designa por estados fenológicos da noqueira.

No quadro 1 e 2 estão apresentados os estados fenológicos da noqueira, da flor masculina e da flor feminina, respetivamente.

Quadro 1 - Estados fenológicos da noqueira (flor masculina) (Adaptado de: Iannamico, 2009).

Estados fenológicos da noqueira – flor masculina		
Designação	Descrição	Figura
Amr	Amentilho em fase de diferenciação	
Amv	Amentilho no final do verão	
Amg	Amentilho em repouso invernal	
Bm	Início do crescimento	
Cm	Individualização das flores masculinas	
Dm	Separação das flores masculinas	
Dm2	Abertura das flores masculinas	
Em	Separação das anteras	
Fm	Início da deiscência das anteras	
Fm2	Deiscência total das anteras	
Gm	Anteras vazias de pólen	
Hm	Queda dos amentilhos	

Quadro 2 - Estados fenológicos da noqueira (flor feminina) (Adaptado de: Iannamico, 2009).

Estados fenológicos da noqueira – flor feminina		
Designação	Descrição	Figura
Af	Gema em repouso invernal	
Af2	Queda das escamas externas	
Bf	Gema inchada	
Cf	Rebentação	
Cf2	Individualização das folhas	
Df	Individualização dos folíolos	
Df2	Folhas soltas	
Ef	Aparecimento das inflorescências	
Ff	Aparecimento dos estigmas	
Ff1	Divergência dos estigmas	
Ff2	Estigmas curvados	
Ff3	Início do escurecimento dos estigmas	
Gf	Estigmas secos	

No desenvolvimento vegetativo, verifica-se um crescimento muito ativo, que vai desde a rebentação até à queda das folhas e decorre durante a primavera. Após a colheita, a árvore ainda mantém as folhas durante um determinado período de tempo, sendo que o período da desfoliação varia consoante as variedades. A queda das folhas marca o início do período de dormência que tem lugar durante o inverno, período em que a planta cessa o seu crescimento.

O fruto é uma noz grande, drupácea, com mesocarpo carnudo e endocarpo duro, enrugado, formado por duas valvas. A semente tem 2 ou 4 lóbulos e apresenta-se com muitos sulcos e reentrâncias (Almeida, 2017).

Deste modo, o epicarpo e o mesocarpo são uma estrutura segmentada em quatro partes que, quando desidratadas, se abrem, deixando o endocarpo e a semente livres. As nozes compostas pelo endocarpo e pela semente têm normalmente 2 a 6 cm de comprimento e pesam 4 a 12 g cada, sendo que o desenvolvimento completo do fruto precisa cerca de 135 a 160 dias, a partir do momento em que ocorre o processo de polinização, apesar de no caso das variedades de floração precoce a maturação ocorra antes das variedades de floração tardia (Associação dos Jovens Agricultores de Portugal, 2017).

2.2.1. Variedades de nozeiras (mais utilizadas)

Afirma Barufaldi (2018) que as variedades que se cultivam na Europa pertencem à espécie *Juglans regia* L. e, distinguem-se pela sua rebentação e frutificação, em função destas, as variedades designam-se de precoces ou tardias. Por sua vez, dentro de cada grupo dividem-se em variedades com frutos de casca mole e de casca dura, distinguindo-se subclasses para produção de frutos comestíveis ou para extração de óleo.

Os pomares em Portugal, apresentam cultivares californianas e francesas, maioritariamente. Entre as variedades californianas que melhor se adaptam ao clima mediterrâneo, estão a *Chandler*, a *Howard*, a *Tulare* e a *Hartley*. Entre as variedades francesas mais conhecidas estão a *Lara*, a *Franquette* e a *Fernette*.

2.2.2. Nutrição

As plantas, são organismos vivos e, deste modo, é imprescindível tanto para se desenvolverem, como para produzirem, terem acesso a nutrientes. Assim, a nutrição vegetal define-se como o conjunto de ocorrências através dos quais a planta recolhe do meio que a rodeia as substâncias necessárias ao seu metabolismo, potenciando o seu crescimento e produção (Santos, 1996).

Maathuis (2009) destaca que as plantas são seres fotoautotróficos, que sintetizam as moléculas orgânicas necessárias ao seu metabolismo usando água, dióxido de carbono, elementos minerais e utilizam a radiação solar como fonte de energia.

É de salientar que as plantas para o seu bom crescimento e desenvolvimento requerem 14 nutrientes essenciais, como por exemplo o azoto (N), o fósforo (P), o potássio (K), o cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o enxofre (S), que estão presentes nos tecidos vegetais em quantidades relativamente grandes.

Segundo Arnon & Stout (1939), para um elemento ser classificado como essencial, tem de satisfazer três parâmetros:

- a) Na ausência do elemento, a planta não completa o seu ciclo de vida;
- b) O elemento não pode ser substituído por outro;
- c) O elemento deve estar diretamente envolvido no metabolismo da planta, como constituinte de um composto essencial, ou ser necessário para a ação de um sistema enzimático.

De acordo com Santos (1996), os macronutrientes principais são elementos absorvidos em quantidades superiores e, geralmente, não existem em quantidades apropriadas no solo ao desenvolvimento das plantas, sendo, por isso, habitual o recurso à aplicação de fertilizantes. O N, o P e o K integram este grupo. Os macronutrientes secundários são elementos que são ainda necessários em quantidades elevadas para as plantas, mas que, na maioria das situações, existem no solo em quantidades adequadas, não sendo por isso necessário, de uma forma geral, recorrer à aplicação de fertilizantes. Este grupo compreende o Ca, o Mg e o S.

Deste modo, os macronutrientes desempenham um papel de extrema importância no crescimento e desenvolvimentos das plantas. Geralmente, a aplicação de macronutrientes aumenta a produtividade, o crescimento e, conseqüentemente, a qualidade das safras. Cada macronutriente tem a sua própria natureza e, portanto, está envolvido em diferentes processos metabólicos da vida vegetal. A deficiência de macronutrientes pode causar problemas graves no crescimento e na aparência das plantas (Tripathi *et al.*, 2014).

Relativamente aos micronutrientes, estes são elementos essenciais para o crescimento das plantas, porém são necessários em quantidades muito menores do que os macronutrientes. As plantas mostram diferentes necessidades para certos micronutrientes. Os elementos deste grupo que geralmente são aceitos como essenciais para todas as plantas são: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e zinco (Zn). Todos os organismos devem adquirir quantidades adequadas de cada micronutriente, pois estes estão envolvidos em praticamente todas as funções metabólicas e celulares (Hänsch & Mendel, 2009).

No caso da noqueira, tanto os macronutrientes principais como os secundários têm grande importância. No caso dos micronutrientes, estes também são indispensáveis para o bom desenvolvimento da cultura, pois intervêm nas funções essenciais e entram na composição de compostos vitais como as proteínas, ácidos nucleicos, atuando também na manutenção da pressão osmótica e do pH da célula (Germain, 1999). Dado a relevância destes para o crescimento das plantas, podem surgir carências nestes elementos na noqueira, nomeadamente, de Fe, de Zn e de B.

Neste tópico do trabalho, devido à extensão do tema, apenas serão abordados e revistos os nutrientes em estudo nesta dissertação, designadamente o N, o Ca e o K.

2.2.2.1. Azoto (N)

O N é um macronutriente principal, deste modo é essencial para o desenvolvimento das plantas, pois desempenha um papel fundamental no metabolismo energético e na síntese proteica. Este macronutriente está diretamente relacionado com o crescimento da planta e é indispensável para a atividade fotossintética e formação da clorofila. O N está envolvido principalmente, na zona aérea, promovendo a multiplicação celular, sendo que a deficiência

deste nutriente resulta em perda de vigor e de cor, tornando o crescimento da planta mais lento e a queda das folhas, começando estes sintomas a serem visíveis na parte inferior da planta. Quando existe excesso de N nas plantas, verifica-se um atraso na floração e as plantas ficam mais débeis, tornando-se menos resistentes a problemas fitossanitários, como pragas e doenças.

Apesar de 80% da atmosfera consistir em N, a forma estável (N_2) não está disponível para as plantas. Tanto os micro-organismos de vida livre como os simbióticos são capazes de fixar o N_2 atmosférico na forma de NH_4^+ (azoto amoniacal), que pode ser absorvido diretamente pelas plantas ou convertido em NO_3^- (azoto nítrico) pelas bactérias nitrificantes, tanto o NH_4^+ como o NO_3^- são altamente móveis no solo, e é absorvida pelas plantas em ambas as formas iônicas. Porém, a forma preferida em que o N é absorvido depende das condições do solo e da espécie da planta (Maathuis, 2009).

É de notar a extrema importância do N, pois devido ao facto de atuar em todas as fases, quer seja no crescimento, na floração ou na frutificação, a aplicação de fertilizantes com N é importante, ao desempenhar um papel relevante no crescimento da cultura, aumentando o rendimento da produção e melhorando a sua qualidade. No entanto, o uso excessivo e a gestão inadequado da fertilização em N na produção agrícola levam à ocorrência de fenómenos de lixiviação e, por isso, contaminação das águas subterrâneas, por exemplo. Consequentemente, existe a destruição do equilíbrio ecológico, o que representa grandes desafios para a saúde humana (Cui *et al.*, 2020).

No caso particular da noqueira, o N beneficia o desenvolvimento da árvore, sendo fundamental na formação de todos os seus tecidos, principalmente nos primeiros 5 anos. Um fornecimento correto de N provoca o aumento de ramos frutíferos e do comprimento dos ramos do ano (superior a 20 cm), ainda induz uma coloração verde escura às folhas, atrasando a sua senescência (Lorente, 1990). No entanto, um excesso de N, favorece a síntese de hidratos de carbono, o que pode provocar o aparecimento de bacterioses e retardar o amadurecimento dos frutos (Miranda, 1974 citado por Regato *et al.*, 2016).

As necessidades da noqueira neste elemento são mais elevadas durante a época de crescimento ativo, fase esta que ocorre de 15 de abril a 15 de julho. Porém, nesta cultura o N deve ser fracionado, aplicando-se 1/3 em finais de abril e 2/3 em meados de maio (Germain, 1999).

2.2.2.2. Cálcio (Ca)

Segundo Thor (2019), o Ca é um macronutriente secundário, sendo um elemento essencial necessário para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Este nutriente é absorvido da solução do solo pelo sistema radicular e translocado para a parte aérea através do xilema. Este macronutriente apresenta uma dupla função, tanto como componente estrutural das paredes e membranas celulares, como mensageiro intracelular em vários processos, que vão desde o crescimento, à fertilização da raiz ou do tubo polínico em resposta aos stresses bióticos e abióticos. Para cumprir a função estrutural, o Ca deve estar disponível para a planta em quantidades suficientes.

Assim, o Ca auxilia no fortalecimento de todos os órgãos das plantas, sobretudo nas raízes e nas folhas e, é um componente da parede celular vegetal, sendo necessário para a manutenção da estrutura e ativação da amilase. É igualmente importante na manutenção do equilíbrio entre alcalinidade e acidez da seiva das plantas e do meio. A forma iônica absorvida pelas plantas é Ca^{2+} (Barros, 2020).

Em geral, a deficiência de Ca como resultado da baixa disponibilidade do solo não é muito comum (White & Broadley, 2003). Porém, pode ocorrer em solos com baixa saturação de bases e/ou altos níveis de deposição ácida (McLaughlin & Wimmer, 1999).

Os sintomas de deficiência ocorrem, no entanto, com mais frequência nos tecidos em desenvolvimento, como folhas e frutos jovens, devido à baixa remobilização dos tecidos velhos para os jovens através do floema. Isto leva a uma forte dependência do suprimento via xilema e, portanto, da transpiração, que em tecidos jovens não é muito alta (Thor, 2019).

Na cultura da noqueira, a carência de Ca atrasa o desenvolvimento das noqueiras e provoca deformações na casca dos frutos (Miranda, 1974 citado por Regato *et al.*, 2016).

2.2.2.3. Potássio (K)

O K é um macronutriente principal, estando este envolvido na regulação da água, no transporte das substâncias de reserva da planta, no aumento da capacidade de fotossíntese, no fortalecimento do tecido celular e na ativação da absorção de nitratos. Este nutriente estimula a floração, a síntese de carboidratos e enzimas, conseqüentemente, proporciona

um aumento na capacidade da planta de resistir a ambientes desfavoráveis, como temperaturas baixas. Além disso, o K desempenha um papel no funcionamento adequado dos estomas. Deste modo, a falta de K reduz a resiliência da planta a períodos de seca e geadas ou mesmo a ataques de fungos. Quando existe deficiências de K, geralmente as plantas apresentam sintomas como cloroses seguidas de necroses, nas extremidades e ao longo das margens das folhas mais velhas. No entanto, níveis excessivos deste macronutriente podem causar antagonismo que levam a deficiências de outros nutrientes, como é o caso do Mg e do Ca e, ainda pode provocar o aparecimento de ferrugem nos frutos.

Nos solos, a maioria do K^+ é desidratado e coordenado com átomos de oxigênio não disponíveis para as plantas, pois apenas quando este mineral sofre alterações estruturais é que liberta o K, deixando o elemento com a capacidade de entrar em equilíbrio com o K da solução do solo, sendo então o K^+ a forma iônica absorvida pelas plantas. A humidade do solo influencia a absorção de K^+ pelas plantas, afetando a taxa de crescimento da raiz, bem como a taxa de difusão do K^+ no solo em direção à raiz. A deficiência de K^+ é rara, mas o crescimento da planta é geralmente estimulado pelo suprimento adicional de K^+ (Maathuis, 2009).

Tal como referido por Barros (2020), é devido a este nutriente que as plantas elaboram os açúcares e o amido. Este é indispensável para a formação e para o amadurecimento dos frutos, sendo que, aumenta a rigidez dos tecidos e a resistência das plantas a pragas e doenças, favorecendo assim o crescimento do sistema radicular.

Na cultura da noqueira, o K é o segundo elemento mais importante para a sua nutrição. Este contribui não só para a síntese de hidratos de carbono, mas também influencia o calibre, a qualidade da noz e induz resistência a doenças, secas e geadas (Regato *et al.*, 2016).

2.2.3. Exigências edafoclimáticas

2.2.3.1. Clima

O clima é um dos fatores mais importantes que determina a distribuição das espécies (Pearson e Dawson 2003 ; Hickler *et al.*, 2012 ; Scheffers *et al.*, 2016 citados por Paž-

Dyderska *et al.*, 2021), sendo a *Juglans regia* L. um exemplo de uma espécie amplamente distribuída na Europa (Lenda *et al.*, 2017).

Em termos geográficos, as zonas onde a noqueira encontra as condições mais apropriadas para o seu desenvolvimento, situam-se entre os paralelos 35° e 45° de latitude norte, porém também se podem encontrar entre os paralelos 10° e 60°. No Hemisfério Sul cultivam-se a uma latitude entre os 20° e 40°. Quanto à altitude considera-se o limite de 1000 a 1200 m, embora no caso de existir o risco de geadas o limite desce para 800 m de altitude (Associação dos Jovens Agricultores de Portugal, 2017).

Embora tenha requisitos de habitat relativamente elevados, hoje em dia, a noqueira é a árvore mais amplamente difundida no mundo (Rigo *et al.*, 2016).

Para Sousa *et al.* (2009) a noqueira sendo uma fruteira de clima temperado, necessita de um determinado número de horas de frio no outono-inverno para o processo da dormência e, assim, atingir uma maior produção. Desta forma, é uma espécie moderadamente exigente em frio invernal, necessitando em média de cerca de 700 horas de frio (soma do número de horas em que a temperatura do ar permanece abaixo de um determinado valor de referência, em geral é considerado o valor de 7°C), para que se inicie o período vegetativo e tenha lugar uma correta floração e frutificação. Se as necessidades de frio não forem satisfeitas, haverá um atraso na formação dos botões, o que resultará numa baixa frutificação e, conseqüentemente, uma diminuição da produção. Este aspeto depende da variedade, havendo variedades californianas que necessitam apenas de 300 horas de frio e, pelo contrário, algumas variedades francesas que necessitam de mais de 1500 horas de frio.

Assim, a noqueira tem melhor desempenho em clima mediterrâneo, em que o número de horas de temperatura entre os 0°C e os 10°C seja de 600 a 800 horas, durante o inverno e não haja a ocorrência de geadas durante a floração. No verão, altura em que ocorre a floração, as temperaturas não devem ser superiores a 38°C, caso contrário, podem representar risco e causar mesmo o abortamento das flores.

As condições do clima mediterrâneo são propícias à ocorrência de geadas tardias na primavera e precoces no outono, que se traduzem num risco prejudicial a esta espécie. Tal como escrito por Germain (1999), estas geadas podem levar à desidratação das extremidades dos ramos, comprometendo a produção do ano seguinte, dado que a formação das nozes sucede na maioria das variedades nos lançamentos originários dos gomos terminais.

Deste modo, a noqueira pode estar em desvantagem devido à sua suscetibilidade à seca e aos danos causados pelo frio nas atuais regiões de cultivo, devido aos aumentos espectáveis da temperatura e eventos climáticos extremos (Wallheimer, 2011).

Relativamente à precipitação, este é um dos fatores climáticos a ter mais em atenção nas nossas condições de cultivo, pois a água é uma das principais limitações da agricultura em clima mediterrâneo, visto que para além de se verificar um elevado deficit hídrico durante o verão, parte da primavera e outono, também ocorrem por vezes anos consecutivos de seca em que as precipitações diminuem drasticamente.

Assim sendo, a precipitação deve ter um padrão bem distribuído ao longo do ano, sendo o valor de precipitação anual de 800 mm adequado para o seu crescimento e rendimento ideais.

2.2.3.2. Solo

O solo é um fator de extrema importância da agricultura e da produção de alimentos, serve de suporte ecológico para a cultura e é através dele que as plantas recebem, de forma contínua, os nutrientes e a água, encontrando nele o ambiente gasoso adequado ao desenvolvimento do seu sistema radicular. A biodiversidade no solo é um aspeto relevante, pois os micro-organismos decompõem a matéria vegetal, reciclam nutrientes, tornando-os disponíveis para as plantas (Verde, 2020).

Para se proceder à instalação de qualquer cultura, deve-se saber primeiramente as características do solo, efetuando estudos do perfil cultural e análises físico-químicas do solo, para este efeito é necessário solicitar apoio técnico.

A noqueira tem uma grande capacidade de adaptação a diversos tipos de solos, sendo as principais condicionantes do seu cultivo, provenientes das propriedades físicas do solo, as quais devem possibilitar uma drenagem rápida e, simultaneamente uma boa retenção de água (Pou, 2001), já que esta cultura necessita de bastante água e requer solo húmido, mas bem drenado, visto que é uma cultura bastante sensível à asfixia radicular. Dado o facto desta espécie ter um coeficiente cultural (K_c) próximo de 1, e da sua fisiologia de transpiração que, ocorre ao nível das folhas, não ter defesas para fechar os estomas para assim conseguir reduzir a transpiração é imprescindível o recurso à rega para a sua produção nas nossas condições climáticas. Desta forma, o fornecimento de água para a

produção das nozeiras deve ser «considerável», caso contrário, o desenvolvimento inicial dos frutos que, corresponde ao crescimento da casca exterior, irá ser notável, ao contrário da segunda etapa de desenvolvimento do fruto que, corresponde ao crescimento do miolo. Este, em condições de stresse hídrico vai ser bastante afetado, podendo a falta de água levar à má formação do mesmo, não havendo enchimento do miolo e assim, acabando a noz por ficar vazia, o que conseqüentemente, levará à desvalorização da produção.

A má drenagem do solo afeta a produção vegetal quer pela presença do excesso de água quer pela ausência de arejamento radicular adequado. Nestas condições, o oxigénio necessário na respiração metabólica é rapidamente consumido pelos micro-organismos e pelas plantas, impossibilitando o crescimento do sistema radicular, o que leva a uma diminuição da absorção de água, podendo em casos extremos ocorrer mesmo o emurchecimento das plantas (Willey, 1970).

Segundo Barkley (2007), os tipos de solo ideais para a cultura da nozeira, são solos argilosos, com valores de pH entre 6,0 e 8,0. A nozeira é uma planta calcífuga, ou seja, é pouco tolerante à presença de Ca no solo e, por isso, o solo deve ter um teor de calcário ativo inferior a 5%. Também é sensível à salinidade, sendo que uma condutividade elétrica do extrato de saturação do solo superior a 3 dS/m pode reduzir a produção em cerca de 30%.

A profundidade do solo é importante para as nozeiras, visto que estas têm uma raiz principal longa e, por isso, devem ser plantadas num solo profundo.

Recomenda-se realizar análise do solo até 40 cm de profundidade e solos compactados limitam seu desenvolvimento. É de ter em conta que esta cultura precisa de boa intensidade luminosa (luz solar) para produzir bem (Martins *et al.*, 2017).

Em suma, a nozeira cresce bem em uma ampla variedade de condições, mas um bom solo é essencial para que as árvores tenham um bom desenvolvimento e ocorra uma safra abundante.

2.3. Detecção remota

A «Detecção Remota» (DR) é a ciência, o conjunto de tecnologias e a arte, que possibilita obter informação sobre objetos, áreas ou fenómenos, através da análise de informação obtida por sensores sem contacto direto com o objeto, área, ou fenómeno em estudo (Rocha, 2002 citado por Martins, 2012).

O processo de aquisição de dados por DR encontra-se ilustrado pela figura 3. O primeiro requisito da DR ótica é a existência de uma fonte que forneça energia eletromagnética ao alvo de interesse, designando-se fonte de iluminação (A). No seu percurso (B) desde a fonte até ao alvo, a energia interage com a atmosfera. Quando a energia regressa ao sensor (D) ocorre uma segunda interação. Depois de atravessar a atmosfera, a energia interage com o alvo (C), de um modo que tanto depende do alvo, como da energia. Após parte da energia ter sido refletida ou emitida pelo alvo, é necessário um sensor remoto (D) para recolher e gravar a radiação. A energia gravada pelo sensor é transmitida sob a forma eletrónica (E), para uma estação de receção e processamento, onde são produzidas as imagens. Desta forma, as imagens processadas são interpretadas, visual ou automaticamente, para se extrair informação sobre o alvo observado (F). Assim, o elemento final (G) no processo da DR é a aplicação da informação extraída da imagem, para uma melhor compreensão, revelação de nova informação, ou apoio na resolução de algum problema.

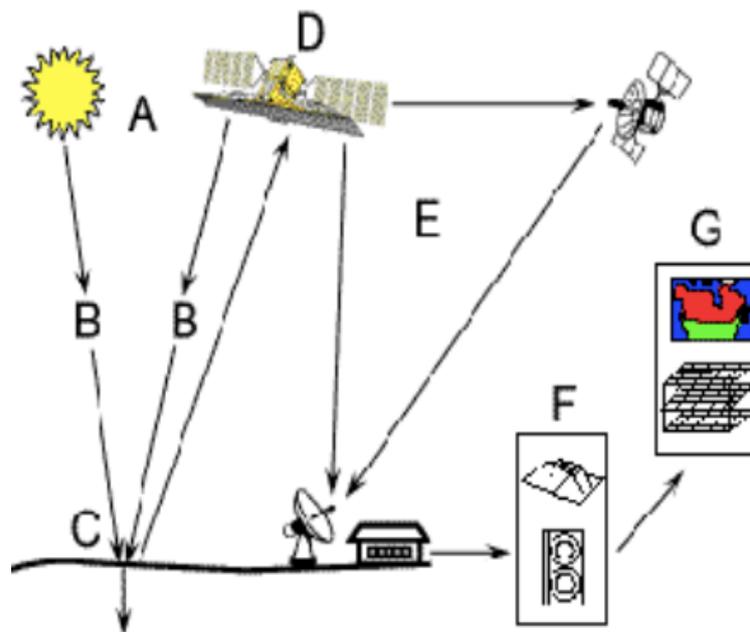


Figura 3 - Processo de Detecção Remota (Canada Centre for Remote Sensing, n.d.).

A crescente utilização de diversos sensores de observação terrestre permite obter uma vasta quantidade de informação, assim como uma nova forma de estudar a superfície da Terra. A DR, simultaneamente com novas técnicas de armazenamento de dados e dos sistemas de informação geográfica (SIG), possibilita obter uma enorme quantidade de dados sobre a superfície terrestre, sendo alguns destes acessíveis em tempo real (Chuvieco, 1995).

Existem dois tipos de sensores remotos: ativos e passivos. De acordo com Science Education through Earth Observation for High Schools (2008), os sensores ativos emitem energia artificial para monitorizar tanto a superfície da Terra, como as características atmosféricas, a maioria destes dispositivos utilizam os comprimentos de onda (λ) na região das micro-ondas, uma vez que são relativamente imunes às condições meteorológicas e hora do dia, conseguindo registar a superfície terrestre de dia ou de noite e sob quais quer condições meteorológicas. Os sensores passivos não emitem a sua própria radiação, apenas recebem luz natural e a radiação refletida pela superfície terrestre, detetam assim, a radiação solar refletida a partir da Terra e a radiação térmica nos λ das regiões do visível (VIS) e infravermelho (IV) no espectro eletromagnético (EEM). Estes últimos, têm como vantagem reunir bandas espectrais estreitas simultaneamente, e como resultado obtém-se as imagens multiespectrais que permitem inúmeras interpretações. Para este trabalho, apenas se irá utilizar dados de satélites com sensores passivos.

Deste modo, a DR destaca-se pela sua versatilidade e encontra-se presente em diferentes campos da ciência, possuindo uma vasta gama de aplicações (Kulawardhana *et al.*, 2007), como por exemplo, aplicações em meteorologia, climatologia, cartografia costeira, distinção de tipos de rochas e minerais, avaliação da vegetação, entre outras. As áreas de aplicação científica mais desenvolvidas incluem: agricultura, silvicultura e ecologia; geologia e exploração mineral; zonas marinhas, costeiras, de águas interiores, húmidas e urbanas; e a própria atmosfera. Existem também inúmeras aplicações militares em camuflagem, mapeamento da zona litoral e deteção de minas terrestres. No caso particular da agricultura, os dados obtidos por DR podem ser aplicados em inúmeras situações, permitindo uma infinidade de benefícios potenciais em rentabilidade, produtividade, sustentabilidade, qualidade da cultura, proteção ambiental e segurança alimentar. Estes benefícios conseguem-se, por exemplo, através de diferentes índices que são otimizados para avaliar um processo de interesse (Brandão, 2009), como é o caso do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*).

Em suma, a DR constitui-se como uma importantíssima forma de observação e estudo dos sistemas agrícolas, no seu todo e, em particular, de cada parcela. Dada as suas características, esta ciência é muito eficaz na caracterização da variabilidade temporal e espacial.

2.3.1. Radiação eletromagnética (REM) e Espectro eletromagnético (EEM)

No tópico anterior foi abordado que o primeiro requisito da DR ótica é uma fonte de energia para iluminar o alvo. Esta energia assume a forma de radiação eletromagnética (REM), que é o termo usado para descrever todos os diferentes tipos de energia libertadas por processos eletromagnéticos, a luz visível é apenas uma das muitas formas de energia eletromagnética.

A REM propaga-se em forma de onda no vácuo à velocidade da luz (aproximadamente, 300000000 m/s), transferindo energia de um lugar para o outro, segundo um modo harmónico e contínuo. Estas ondas carregam energia com oscilações sincronizadas de campos eléctrico (E) e magnético (B) que são perpendiculares entre si, e perpendiculares à direcção de propagação da radiação (Quin, 2019) (Figura 4).

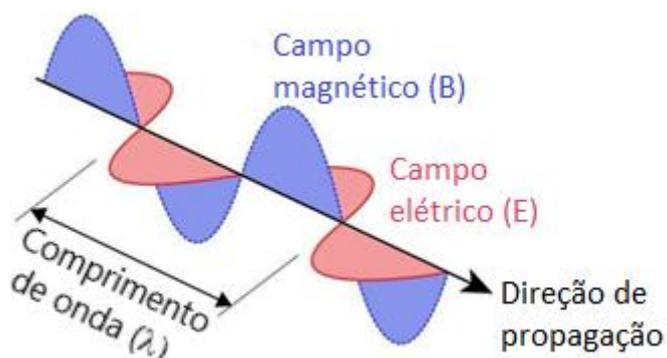


Figura 4 - Radiação eletromagnética (Adaptado de: Quin, 2019).

Segundo Fonseca & Fernandes (2004) em DR, a REM é geralmente caracterizada pelo λ que, corresponde à distância entre valores repetidos sucessivos num padrão de onda, no espectro de REM e pela frequência (Hz), que é o número de ondas completas (1 ciclo) que passa por um dado ponto por unidade de tempo (s). A unidade do Sistema Internacional (SI) é o micrómetro ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ m), apresentando-se também estes valores em nanómetros ($\text{nm} = 10^{-9}$ m).

O EEM é o termo usado para descrever toda a gama de todas as frequências possíveis de REM, ou seja, é o conjunto de λ que compõem a REM que, por sua vez, este é dividido num certo número de regiões espectrais (Figura 5).

As várias zonas do espectro de interesse em estudos de DR estão compreendidas entre a região correspondente à radiação ultravioleta (UV) e a região correspondente à radiação das micro-ondas.

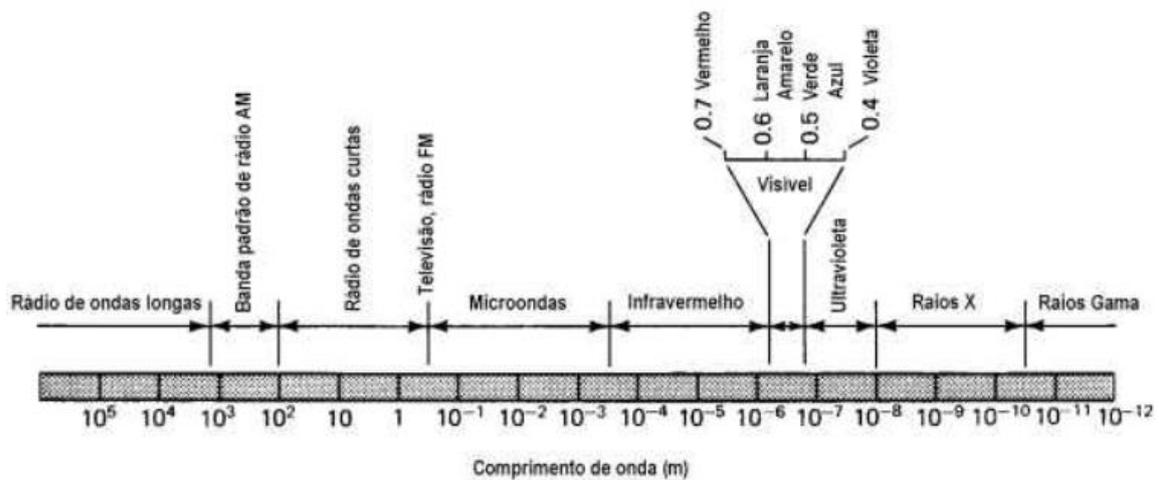


Figura 5 - Espectro eletromagnético (Grimm, 2006).

A região do VIS do EEM, representa o intervalo de λ a que o olho humano responde, esta região varia entre os $0,4 \mu\text{m}$ – $0,7 \mu\text{m}$, sendo o menor λ correspondente à cor violeta e o maior à cor vermelha. Pelo facto de a região do VIS representar uma porção muito pequena do total do espectro, há imensa radiação no ambiente à nossa volta que nos é invisível, mas que pode ser detetada por instrumentos e ser usada em DR. É de salientar, que na região entre os $3,0 \mu\text{m}$ e os $5,0 \mu\text{m}$, a superfície terrestre simultaneamente reflete e emite radiação (Pereira, 2017).

No quadro 3 estão apresentadas as várias regiões do EEM que são mais relevantes para estudos da superfície terrestre.

Quadro 3 - Zonas do espectro eletromagnético mais utilizadas em detecção remota para estudos da superfície terrestre (Adaptado de: Sousa & Silva, 2017).

Zona do espectro		Intervalo de comprimento de onda (μm)
Vísivel (VIS)	Azul	0,42 – 0,49
	Verde	0,49 – 0,58
	Vermelho (V)	0,58 – 0,70
Infravermelho (IV)	IV próximo (IVP)	0,70 – 1,30
	IV médio (IVM)	1,30 – 3
	IV térmico (IVT)	> 3

2.3.2. Interferência atmosférica

Em DR passiva, existem duas fontes naturais mais usadas de REM, são elas: o sol que é a mais potente fonte de REM que atinge a superfície da Terra e, a própria Terra que apesar de numa ordem de grandeza bem menor que o sol, também emite REM. O que quer dizer que, tanto a radiação do sol como a reflexão da superfície terrestre atravessam a atmosfera antes de chegarem ao sensor instalado no satélite. Desta forma, durante a passagem da REM na atmosfera, esta interage com as partículas e gases presentes na atmosfera, essencialmente através de dois fenómenos: dispersão e absorção (Saavedra, 2020).

A dispersão ocorre quando partículas ou grandes moléculas gasosas presentes na atmosfera interagem com a REM, fazendo com que esta seja desviada da sua trajetória original. A magnitude deste fenómeno depende de vários fatores como: λ da radiação, a abundância de partículas e gases e a distância que a radiação percorre pela atmosfera. A absorção ao contrário da dispersão, faz com que as moléculas da atmosfera absorvam energia a vários λ . O conteúdo atmosférico dos gases com efeito estufa absorve parte da radiação da Terra. O ozono (O_3) funciona como uma barreira quase total contra a radiação UV e absorve quase toda a radiação de λ entre os 9,5 μm e os 10 μm . Quanto ao vapor de água ($\text{H}_2\text{O}_{(g)}$) e ao CO_2 , estes são gases de efeito de estufa muito eficazes que absorvem a radiação em diferentes λ do IV. A atmosfera é também quase 100% translúcida em certas regiões do espectro do IVP, o que possibilita a observação de satélite com um mínimo de distorção

atmosférica. Relativamente à região do IVT, que está compreendida entre os 10 µm e os 12 µm, é utilizada para medir temperaturas da superfície do solo, da água e das nuvens.

Embora a DR tenha lugar nas janelas atmosféricas (nome dado aos intervalos espectrais com uma elevada transmitância atmosférica, através das quais a radiação passa livremente do espaço para a Terra ou vice-versa), possui ainda alguma interferência provocada pela dispersão e absorção na atmosfera. Por este motivo, a DR pode, muitas vezes, apresentar ligeiras distorções e deve ser ajustada através de um posterior processamento de imagem digital (European Space Agency, 2009).

2.3.3. Interferência da radiação eletromagnética (REM) com a superfície terrestre e em particular com a vegetação

A energia incidente está na forma de ondas eletromagnéticas e, quando esta encontra um objeto pode interagir com ele através de três processos, são eles: a absorção, a transmissão e a reflexão, representados na figura 6, podendo então essa energia interagir com a superfície terrestre através de um ou mais destes três processos.

O que determina se a radiação (energia) é absorvida, transmitida ou refletida, depende em grande parte do λ da energia que está a ser transportada, assim como do tamanho e da natureza do material que intervém. O processo de absorção ocorre quando a radiação é absorvida pelo alvo. A radiação é transmitida quando existe falta de interação da energia incidente nos objetos, atravessando assim o próprio objeto sem ocorrer nenhuma alteração (Fonseca & Fernandes, 2004). A energia da radiação é refletida quando a radiação incide no objeto e é «devolvida» por este, sendo assim redirecionada. A quantidade de energia refletida que alcança o sensor depende de vários fatores, são eles: a estrutura da superfície, o ângulo incidente e a refletância da superfície dos objetos (razão entre a energia incidente e a energia refletida por unidade de superfície).

A equação que relaciona estas três variáveis encontra-se apresentada na Equação 1:

$$EI(\lambda) = EA(\lambda) + ET(\lambda) + ER(\lambda), \quad (1)$$

em que:

- EI (λ) - Energia incidente;
- EA(λ) - Energia absorvida;
- ET(λ) - Energia transmitida;
- ER(λ) - Energia refletida;

Equação 1 - Equação da interação da energia incidente com a superfície terrestre.

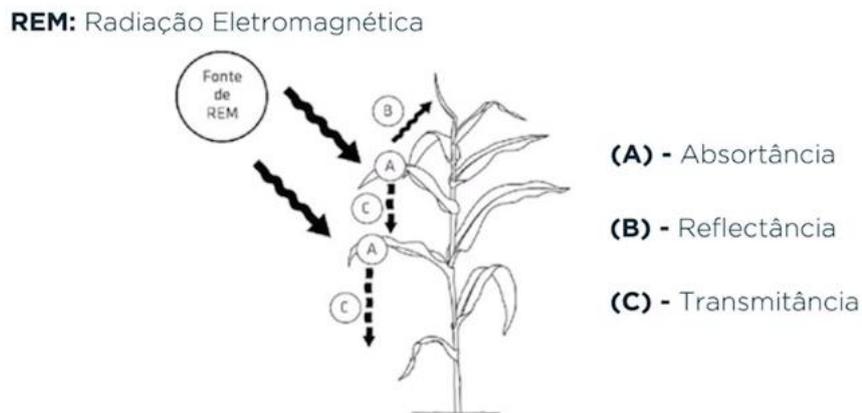


Figura 6 - Interação da radiação eletromagnética com a planta (DronEng, 2018).

Dos 3 processos descritos anteriormente, a reflexão é o fenômeno mais relevante em DR, pois a maioria dos sistemas passivos registam a radiação refletida pela superfície terrestre (Fonseca & Fernandes, 2004).

2.3.4. Assinaturas espectrais

As assinaturas espectrais referem-se à intensidade relativa com que cada corpo emite ou reflete a REM nos diferentes λ . Logo, consoante o tipo de superfície, como o solo, a vegetação, a água, entre outros, a reflexão da radiação ocorre de forma diferente, sendo a radiação refletida em função do λ denominada de assinatura espectral da superfície.

Pereira (2017) indica que o comportamento espectral da vegetação varia consoante o tipo de vegetação (Figura 7). A clorofila é um composto químico presente nas folhas da vegetação que, absorve principalmente os λ na região do V e do azul para usar no processo de fotossíntese e, reflete os λ na região do verde. Deste modo, a refletância da vegetação verde é bastante diferente dos restantes materiais e varia muito com o λ , permitindo distinguir três regiões espectrais:

- No **VIS**, a maior parte da radiação é absorvida pelos pigmentos, sobretudo pela clorofila. A refletância é muito baixa nas regiões do azul e do V, sendo que as bandas de absorção pela clorofila estão centradas a 0,45 μm e a 0,65 μm . Entre estas bandas existe um pico de refletância (0,54 μm), que corresponde à vegetação saudável, conferindo-lhe uma cor verde.
- No **IVP** as folhas verdes absorvem pouca radiação, desta forma, a refletância e a transmitância aumentam muito. Assim, obtém-se valores de refletância e transmitância entre os 45 e os 50% e de absorvância inferiores a 5%.
- No **IVM**, os valores de refletância e de transmitância são mais baixos que no IVP. Estes encontram-se controlados pela estrutura interna da folha e são atenuados pela água dos tecidos foliares. As bandas características de absorção da água situam-se nos 1,43 μm , 1,95 μm e nos 2,4 μm . Quanto aos picos de refletância, nesta região, ocorrem a 1,6 μm e 2,2 μm , entre as bandas de absorção.

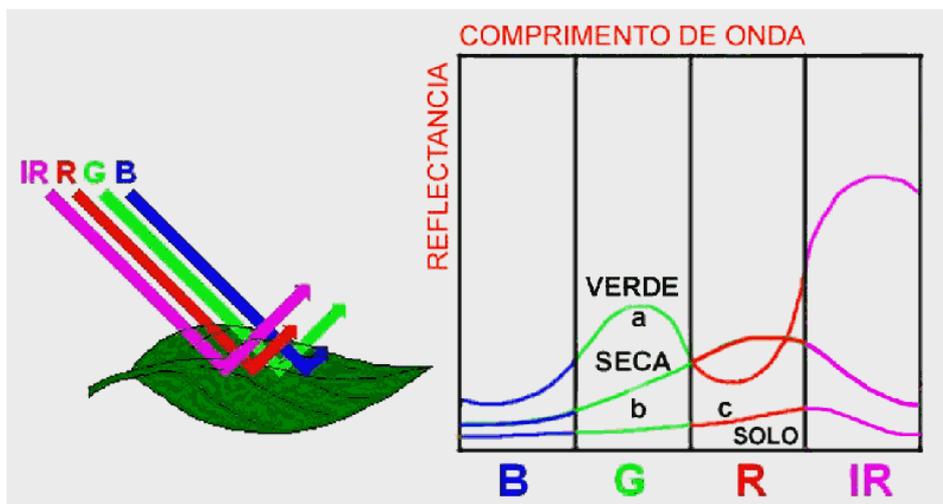


Figura 7 - Comportamento espectral das folhas (Steffen, 1999).

A figura 8 apresenta a refletância (resposta espectral) da vegetação e do solo exposto (sem vegetação). Verifica-se que relativamente à refletância da vegetação, representada pela cor vermelha, o consumo varia de acordo com a banda espectral apresentada na parte superior da figura. Para além da clorofila existem outros fatores que influenciam a refletância da vegetação, destacando-se a pigmentação, o estado nutricional, a anatomia das folhas, o teor de água, o estado fenológico e as doenças (Roy, 1989 citado por Vilar, 2015). É de constatar

que, quando as plantas estão sob condições de stresse de algum fator, existe uma redução da produção de clorofila, havendo menor absorção nas suas bandas características. Quanto à resposta espectral do solo exposto, representada pela cor azul, é mais homogênea, com um ligeiro crescimento da refletância à medida que aumenta os λ , mas sem alterações significativas em relação às bandas espectrais.

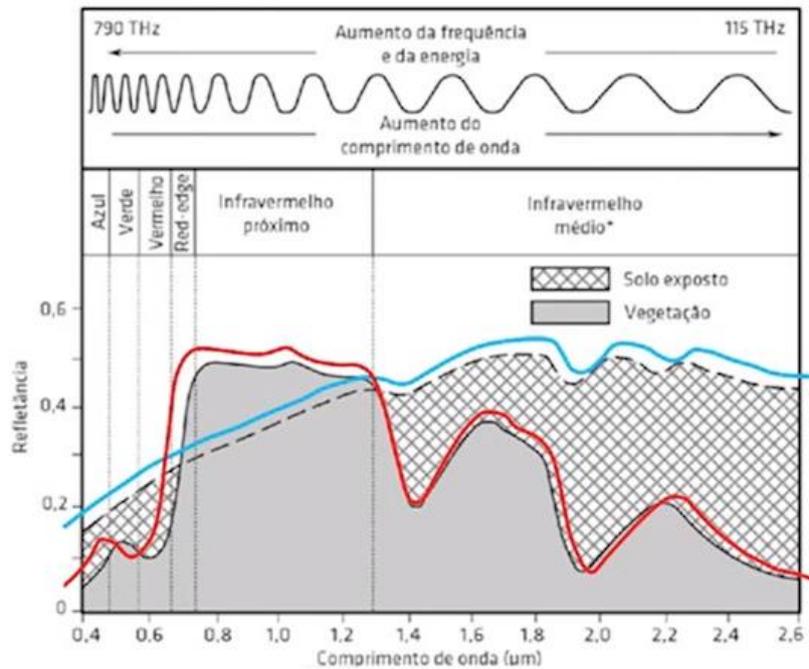


Figura 8 - Curvas da refletância espectral típicas da vegetação e do solo exposto (DronEng, 2018).

Desta forma, é possível distinguir a resposta de um solo exposto e de uma planta, o que é bastante relevante, pois permite distinguir respostas e identificar atividades fotossintéticas das plantas para avaliar o seu consumo e, conseqüentemente, o seu estado nutricional.

2.3.5. Sensores óticos multiespectrais

Steffen *et al.* (1981) definiu um sensor remoto como um dispositivo capaz de responder à REM de determinada faixa do EEM, registá-la e gerar um produto numa forma adequada para a interpretação do utilizador.

Atualmente existem inúmeros tipos de sensores com aplicação em DR, adaptados a diferentes finalidades, podem ser classificados fundamentalmente pelo tipo de aplicação e

de radiação utilizada e, pelo caráter ativo/passivo do sensor (Klemas, 2009). Ainda podem ser distinguidos pelo tipo de plataforma de suporte, pelo tipo de órbita (no caso dos satélites) e pelo tipo de resolução (espacial, espectral, temporal e radiométrica).

Neste tópico abordam-se os sensores óticos. Estes centram-se numa parte do espectro que engloba a luz visível (aquela que é perceptível pelos olhos humanos) e a radiação IV (invisível aos olhos humanos).

Os sensores óticos multiespectrais registam informação sob a forma de imagens multiespectrais individuais, cada uma representando um intervalo no EEM. De acordo com Mather (2005), a posição no EEM, a largura e o número de bandas determinam o grau de discriminação dos diferentes objetos presentes numa imagem multiespectral, de forma que a utilização de imagens multiespectrais proporciona um maior grau de poder de discriminação dos objetos do que cada banda individual

A resolução espectral de um instrumento de DR, refere-se à capacidade do sensor distinguir os diferentes intervalos de λ do EEM, em número e amplitude do intervalo, sendo tanto maior quanto maior for o número e menor a amplitude dos intervalos espectrais registados. Assim, produz-se uma assinatura espectral mais rigorosa de objetos discretos do que recorrendo a bandas mais largas.

2.3.6. Índice espectral de vegetação

Os índices espectrais de vegetação (IVs), ou apenas, índices de vegetação têm sido amplamente utilizados para monitorizar a cobertura vegetal da Terra em escalas global e/ou local (Miura *et al.*, 2001). Segundo Moreira (2000), estes índices resultam da combinação de dados espectrais de duas ou mais bandas, selecionadas com o objetivo de sintetizar e melhorar a relação desses dados com os parâmetros biofísicos da vegetação. De modo, a reduzir a variabilidade causada por fatores externos, a refletância espectral tem sido transformada e combinada em vários IVs (Ponzoni, 2001).

A utilização de IVs constituem dados auxiliares importantes para a monitorização das alterações naturais ou produzidas pelo homem nas superfícies continentais (Feitosa *et al.*, 2004), dado que os IVs ressaltam o comportamento espectral da vegetação possibilitando assim, diferenciar tipos de cobertura e uso da terra (Moreira, 2005). Estes permitem

também fazer uma melhor identificação das áreas com vegetação não saudável, que apresentam baixa refletividade no IVP, o que se torna bastante relevante, hoje em dia, para a monitorização das culturas agrícolas, por exemplo.

O NDVI é um dos IVs mais amplamente utilizado e a monitorização da cobertura vegetal foi bem demonstrada nas últimas duas décadas (Huete & Liu, 1994). Este índice é um indicador da atividade fotossintética da planta, estando assim relacionado com o conteúdo de clorofila nas folhas e, também oferece uma informação do tipo nutricional. Assim, o NDVI é um indicador simples de biomassa fotossinteticamente ativa que, ajuda a diferenciar a vegetação de outros tipos de cobertura do solo e a determinar o seu estado geral, permitindo definir e, conseqüentemente, visualizar áreas de vegetação, possibilitando detetar alterações anormais no desenvolvimento vegetativo de uma cultura.

O NDVI é calculado através de uma equação que tem como variáveis as bandas do IVP e do V, como apresentado na Equação 2:

$$NDVI = \frac{(IVP-V)}{(IVP+V)} \quad (2)$$

onde,

- IVP: valor de refletância da banda do infravermelho próximo;
- V: valor de refletância da banda do vermelho.

Equação 2 - Equação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index).

Os valores de variação deste índice são -1 a 1, indicando a quantidade de vegetação, distinguindo plantas do solo e minimizando os efeitos causados pela topografia, entre outros. Como referido por Sousa & Silva (2017), este índice apresenta valores elevados nas áreas de vegetação, devido à refletância relativamente elevada no IVP e baixa refletância no V. Com valores negativos surgem as nuvens, água e neve, cujas refletâncias são maiores no V do que no IVP. Os solos apresentam refletâncias similares nas duas bandas, o que resulta num IVs próximo de zero.

Concluindo, pela observação da figura 9 verifica-se que a vegetação saudável (esquerda) absorve a maior parte da radiação recebida, com exceção do IVP. Quando a vegetação apresenta algum problema (direita), não estando a expressar o seu máximo vigor vegetativo, reflete mais radiação no VIS e menos no IVP. Os valores representados nesta figura são representativos de condições reais (Pereira, 2017).

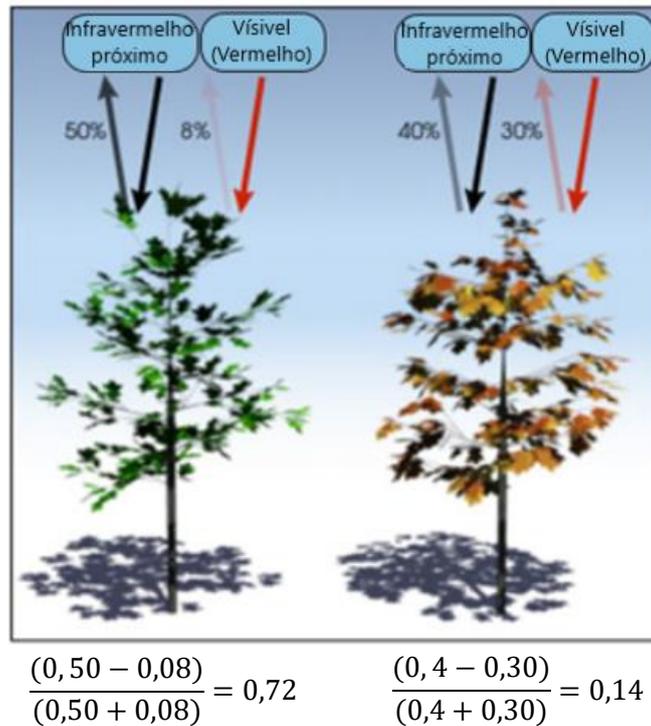


Figura 9 - Ilustração do comportamento do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Adaptado de: National Aeronautics and Space Administration, 2000).

O índice de água por diferença normalizada (NDWI, *Normalized Difference Water Index*), é um índice que reflete o conteúdo de água nas plantas e no solo. Este indicador permite controlar a rega, em tempo real, melhorando consideravelmente a agricultura, visto ser a água um fator de extrema importância, principalmente em áreas onde é difícil atender às necessidades da cultura em água. De acordo com Gao (1996), o NDWI é um bom indicador para o conteúdo de água líquida da vegetação e é menos sensível aos efeitos de espalhamento atmosférico do que o NDVI.

O NDWI é calculado através de uma equação que tem como variáveis as bandas do IVP e do VIS, como apresentado na Equação 3:

$$NDWI = \frac{IVP - IVM}{IVP + IVM} \quad (3)$$

onde,

- IVP: valor de refletância da banda do infravermelho próximo;
- IVM: valor de refletância da banda do infravermelho médio.

Equação 3 - Equação do índice de água por diferença normalizada (NDWI, Normalized Difference Water Index).

O valor deste índice varia de -1 a 1, dependendo não só do conteúdo de água nas folhas, mas também do tipo de vegetação e cobertura. Este indicador quando apresenta valores elevados expressa a existência de um alto conteúdo de água na vegetação. Sendo que os valores baixos correspondem ao baixo conteúdo de água na vegetação. É de salientar, que em períodos de stresse hídrico, o NDWI diminuirá.

2.3.7. Programa Copernicus

O Programa *Copernicus* foi desenvolvido pela *European Space Agency* (ESA), é coordenado e gerido pela Comissão Europeia e consiste num Programa de Observação da Terra da União Europeia, que analisa o Planeta Terra e o seu ambiente. Este programa oferece serviços de informação baseados na observação da Terra por satélite e dados in situ (não espaciais), sendo que conta com satélites e missões colaboradoras para fornecer dados, de modo a monitorizar o meio ambiente e apoiar atividades de segurança civil. Os satélites que fazem parte do Programa *Copernicus* são:

- Sentinel-1: disponibiliza imagens de radar (micro-ondas), independentemente da hora do dia e das condições climáticas, para os serviços do meio terrestre e do oceano. O Sentinel-1 conta com o Sentinel-1A e o Sentinel-1B, lançados em abril de 2014 e abril de 2016, respetivamente.
- Sentinel-2: fornece imagens óticas de alta resolução espacial para os serviços terrestres e ainda fornece informações para os serviços de emergência. O Sentinel-2 conta com o Sentinel-2A, sendo que este foi o primeiro satélite ótico de observação da Terra no

Programa europeu *Copernicus* e foi lançado em junho de 2015, e o Sentinel-2B lançado no mês de março de 2017.

- Sentinel-3: fornece dados de altimetria, radar e óticos de elevada precisão para os serviços terrestres e marinhos. O Sentinel-3 conta com o Sentinel-3A e o Sentinel-3B, lançados em abril de 2016 e em abril de 2018, respetivamente.

Também foram lançados outros satélites Sentinel para estudos da atmosfera, sendo eles: Sentinel-4 (lançado em 2019), Sentinel-5P (lançado em 2017) e Sentinel-6 (lançado em 2020).

2.3.7.1. Satélite Sentinel-2

A missão *Copernicus* Sentinel-2 (Figura 10), é baseada numa constelação de dois satélites (2A e 2B) idênticos na mesma órbita sincronizada com o sol, faseados 180° entre si, permitindo assim levantamentos repetidos a cada 5 dias no equador, em condições de ausência de nuvens e, a cada 2-3 dias em latitudes médias, deste modo ajudará na monitorização das alterações na superfície terrestre. Este foi projetado com o intuito específico de fornecer uma grande variedade de dados e imagens.



Figura 10 - Satélite Sentinel-2 (European Space Agency, 2015b).

Cada satélite (Sentinel-2A e Sentinel-2B) carrega um instrumento multiespectral de alta resolução com 13 bandas espectrais (Quadro 4), com elevada resolução espacial de 10 m (4 bandas no VIS e IVP), 20 m (6 bandas no vermelho limite (*Red Edge*), IVP (*near infrared*) e IVM (*short wave infrared*)) e 60 m (3 bandas para estudos atmosféricos). Desta forma, dão uma nova perspectiva da superfície da Terra e da vegetação, pois estes dois satélites juntos cobrem toda a superfície terrestre (exceto a Antártida), grandes ilhas e águas interiores e costeiras (Earth Observing System, 2015).

Quadro 4 - Bandas espectrais e resolução espacial do satélite Sentinel-2 MSI.

Sensor Multiespectral Sentinel-2			
Bandas	Região espectral	Comprimento de onda (nm)	Resolução espacial (m)
B1	Aerossol	430 - 450	60
B2	Azul	458 - 523	10
B3	Verde	543 - 578	10
B4	Vermelho	650 - 680	10
B5	Vermelho limite (<i>Red Edge</i>)	698 - 713	20
B6	Vermelho limite (<i>Red Edge</i>)	733 - 748	20
B7	Vermelho limite (<i>Red Edge</i>)	773 - 793	20
B8	IVP 1 (Infravermelho próximo)	785 - 899	10
B8A	IVP 2 (Infravermelho próximo)	855 - 875	20
B11	IVM (Infravermelho médio)	1565 - 1655	20
B12	IVM (Infravermelho médio)	2100 - 2280	20

Assim, os dados do satélite Sentinel-2 são usados para uma variedade enorme de aplicações e, em diversas áreas, como por exemplo, na monitorização marítima e de terras, em que fornece informação sobre a dinâmica dos oceanos e fornece informações geográficas sobre o estado da vegetação, respetivamente, na gestão de emergência fornecendo informações geoespaciais precisas e oportunas e, ainda na segurança com a vigilância de fronteiras (European Space Agency, 2015a).

2.4. Espectroscopia de infravermelho próximo

2.4.1. História

A espectroscopia de IVP foi descoberta por Herschel, no ano de 1800. Através da utilização de um prisma de vidro para dispersar a luz solar e com recurso a um termómetro, Herschel mediu a temperatura de cada cor do espectro. Desta forma verificou que a temperatura aumentava à medida que se aproximava do V. Ao realizar o mesmo processo na zona logo acima da região espectral do V observou valores ainda mais elevados, demonstrando a existência de componentes de luz que não eram visíveis ao olho humano. Esta radiação foi então denominada de IVP (Naes *et al.*, 2002).

Apesar da sua descoberta ter sido feita há mais de um século, só no final dos anos 70, com o desenvolvimento da quimiometria, ciência que aplica métodos estatísticos em dados químicos, é que permitiu que a complexidade espectral na região do IVP fosse melhor compreendida e utilizada. Hoje em dia, esta técnica passou a ser uma alternativa como método de medição, sendo que é considerada uma das tecnologias mais avançadas para a determinação do teor de nutrientes de forma não destrutiva em produtos de origem vegetal (Zareef *et al.*, 2020).

2.4.2. Descrição da tecnologia

A espectroscopia com recurso à radiação IVP, é uma técnica não destrutiva e não invasiva, tem uma aplicação quase universal (qualquer molécula que contenha as ligações C-N, N-H, S-H ou O-H pode ser analisada) e o tempo de análise pode ser de apenas alguns segundos (Ceitil, 2007). Deste modo, as principais vantagens do uso da espectroscopia IVP que se destacam são, a rapidez nas determinações, preservação, preparação mínima da amostra e a reduzida utilização de reagentes químicos. Estas características fazem deste método uma alternativa eficiente, barata e que pode ser utilizada em amostras de diferentes tipos.

Segundo Reich (2005) a região do IV encontra-se dividido em três regiões:

- Infravermelho próximo (NIR, *Near Infrared*): 4000 – 12500 cm^{-1} ;
- Infravermelho médio (MIR, *Middle Infrared*): 400 – 4000 cm^{-1} ;

- Infravermelho longínquo (FAR, *Far Infrared*): $10 - 400 \text{ cm}^{-1}$;

Assim, a região espectral do IVP compreende o intervalo entre os 800 e os 2500 nm, para leituras em λ e que equivale a $4000 - 12500 \text{ cm}^{-1}$ para leituras em números de onda (Siesler *et al.*, 2002).

A espectroscopia no IVP e no IVM são técnicas cada vez mais utilizadas em controlo de qualidade de processos e produtos industriais (Blanco *et al.*, 1998). Segundo Santos (2007) usando o espectro de absorção da radiação na região infravermelha estas metodologias permitem a caracterização qualitativa e quantitativa de amostras de materiais em processamento.

A espectroscopia IVP baseia-se no facto das ligações químicas das substâncias possuírem frequências de vibração específicas, as quais correspondem a níveis de energia da molécula. Desta forma, a espectroscopia IVP mede a absorção de radiação IV pelas ligações químicas num determinado material (Lily & Simmons, 1999).

Para que tal aconteça, a radiação tem que incidir na molécula e ser absorvida por parte desta, provocando a excitação dos modos vibracionais, de forma a que a energia absorvida corresponda à diferença de dois níveis energéticos vibracionais. Assim, é possível que ocorra absorção por parte da molécula, a um determinado λ , que corresponde à energia que permite a transição.

Deste modo, um espectro de IVP é a representação gráfica do λ da radiação absorvida e todas as bandas de absorção formadas são resultado da combinação de tons e sobretons (sobreposições) (Siesler *et al.*, 2008 citado por Tufik, 2017) (Figura 11).

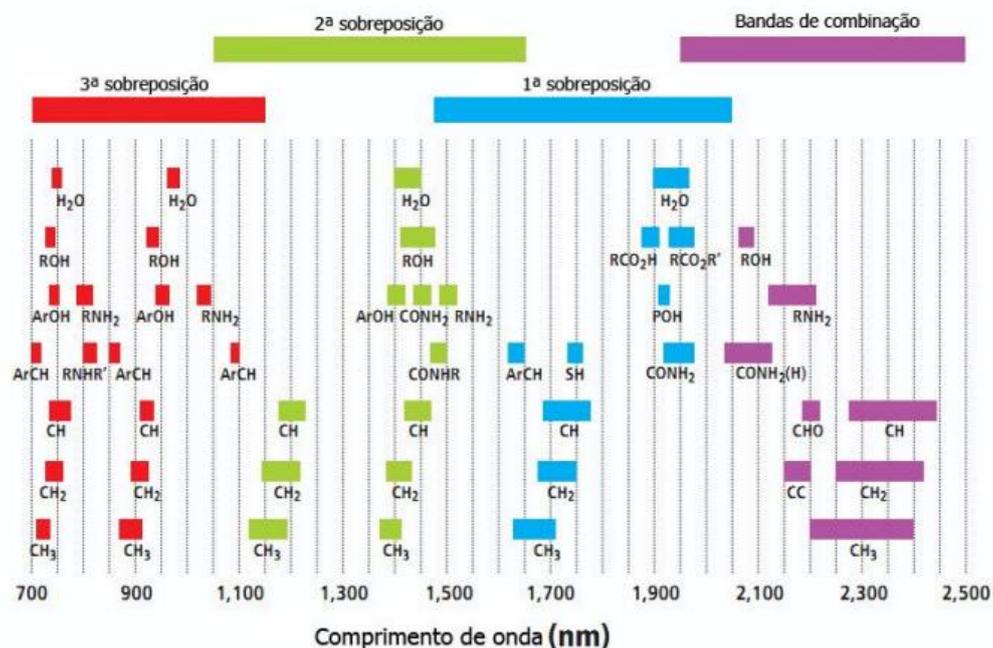


Figura 11 - Sobretons (sobreposições) e combinações de bandas na área espectral do NIR (Adaptado de: Metrohm, 2006).

2.4.3. Equipamento

Um espectrômetro é geralmente constituído por uma fonte de luz, um sistema ótico, um suporte para a amostra e um detetor. A fonte luminosa utilizada pode ser lâmpadas de halogênio, quartzo ou LEDs (Ilharco, 2009 citado por Almeida, 2009) (Figura 12).

A energia radiante que é produzida pela fonte, é direcionada para o dispositivo onde ocorre a repartição dos feixes nos seus diferentes λ . Estes ao incidirem na amostra produzem uma interferência que é captada no detetor, medindo este, por sua vez, a intensidade do feixe emergente, gerando um interferograma.

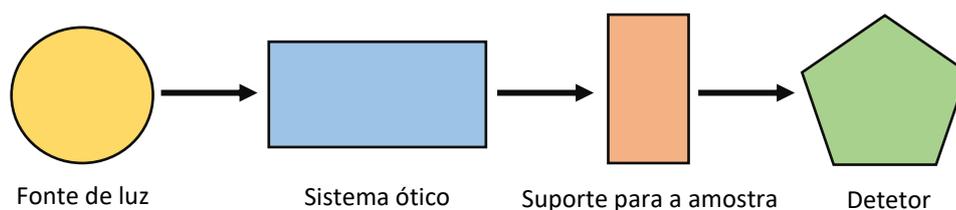


Figura 12 - Configuração básica de um espectrômetro.

2.4.4. Equipamento espectrômetro NIR com Transformada de *Fourier* (FT-NIR)

Embora existam vários tipos de espectrômetros, hoje em dia, os mais utilizados para medições na região do IVP são espectrômetros com Transformada de *Fourier* (FT-NIR), pois apresentam vantagens sobre os restantes.

Estes equipamentos têm por base um interferômetro, que produz um interferograma, o qual contém informação sobre todas as frequências do espectro IV. A Transformada de *Fourier* é uma função matemática, que relaciona a intensidade do interferograma com as respetivas frequências, reproduzindo um espectro. O tratamento matemático da Transformada de *Fourier* é aplicado ao interferograma, sendo este convertido numa curva de energia, que facilita a leitura dos resultados (Araujo, 2007).

O espectrômetro que se utilizou para o estudo foi um FT-NIR modelo MPA (*Multi Purpose Analyzer*) da *Bruker Optik GmbH, Germany*, como apresentado na figura 13, que pode efetuar leituras, tanto em refletância difusa, como em transmitância.



Figura 13 - Equipamento espectrômetro NIR com Transformada de *Fourier* modelo MPA – *Bruker Optik GmbH, Germany*.

2.5. Enquadramento da temática abordada neste trabalho

A utilização da DR para a caracterização de algumas culturas tem vindo a ser otimizada, sobretudo, desde os anos 2000. Atualmente, o recurso a dados obtidos por meio de DR tem

como intuito auxiliar os sistemas de produção agrícola, de modo a simplificar a investigação das áreas cultivadas e, simultaneamente, prever eventuais problemas através de informação georreferenciada, auxiliando assim o produtor na sua tomada de decisão. Os parâmetros mais utilizados em DR, através de dados diretos do satélite são: o NDVI, o NDWI, o índice de humidade por diferença normalizada (NDMI, *Normalized Difference Moisture Index*) e as bandas espectrais. Contudo, há objetivos de estudo, como é o caso: da visualização das variações ocorridas através das curvas espectrais das áreas em estudo, da biomassa e da identificação de áreas com infestação de espécies invasoras que são baseados em dados diretos do satélite.

Os estudos realizados com o recurso a estes dados têm se verificado mais acentuadamente em culturas anuais, como é o caso do milho, arroz, soja, hortícolas, entre outras. Porém, também se têm realizado estudos em plantas perenes, como é o caso do cafeeiro. Verifica-se, contudo, que os estudos são direcionados para grandes áreas e, maioritariamente, na região do Brasil. Muitos destes trabalhos são realizados com recurso às imagens do satélite Sentinel-2, que apesar de recente, pode ser justificado por ser o único satélite com imagens gratuitas e que inclui bandas da região do vermelho limite (*Red Edge*) com resolução espacial razoável (20m), além de bandas do V e do IVP com boa resolução espacial (10m), tal como mencionado por Ferreira (2019).

Deste modo, com os inúmeros estudos realizados nesta área verifica-se, que é possível com o recurso à DR, como referido por Maso *et al.* (2019), Ricardo (2018) e Feio (2017), diferenciar as fases de desenvolvimento de uma cultura, auxiliar na deteção de problemas, tais como doenças, pragas, nutrientes, através das alterações que ocorrem ao nível das assinaturas espectrais e IVs. Ainda, como descrito por Mee *et al.* (2017), a DR permite medições de refletância espectral, ajudando a identificar e a selecionar λ sensíveis a diferentes tipos de stresse da planta, facilitando a deteção precoce do stresse da planta e, particularmente, a deficiência de nutrientes. No caso particular, do recurso à DR a dados de satélite Sentinel-2, Ferreira (2019) verificou que essa informação se encontra relacionada com características estruturais de parcelas de pinhais, nomeadamente a biomassa e Chemura *et al.* (2018) apurou que as bandas espectrais, nomeadamente as bandas do vermelho limite (*Red Edge*) (B6 e B7), IVP (B8) e IVM (B11), estão fortemente relacionadas com o N presente nas folhas de cafeeiro, por conseguinte, é possível utilizar mapas de distribuição de N para fazer a gestão dos nutrientes em plantações de café com recurso a estes dados. Assim, atualmente, como afirmado por Yousfi *et al.* (2019), os

métodos baseados nesta técnica têm sido propostos como indicadores potenciais para a rápida identificação dos níveis de N nas culturas e para fornecerem informações sobre as propriedades da vegetação em grandes áreas.

Algumas limitações da aplicação dos dados obtidos por DR encontradas por autores como Ricardo (2018), Machado (2018) e Monteiro (2020) deve-se à natureza dinâmica da agricultura e de outros fatores, em que os resultados que se obtêm para um determinado ano e local não podem ser diretamente extrapolados para outro ano ou local, bem como a diversidade natural das paisagens e as limitações dos instrumentos de medição, tornando a validação contínua por DR ainda um desafio. Não obstante, a maioria dos resultados obtidos mostram-se satisfatórios, ainda que sujeitos a melhorias, comprovam a variabilidade e justificam a utilização destes dados.

3. Materiais e Métodos

3.1. Caracterização do local em estudo

As recolhas das amostras para a realização deste trabalho decorreram num pomar de nogueiras, de um produtor particular no concelho de Estremoz, distrito de Évora, com as coordenadas geográficas 38°49'37''N e 7°29'03''W (Figura 14 e 15). A área em estudo totaliza 25,24 ha.

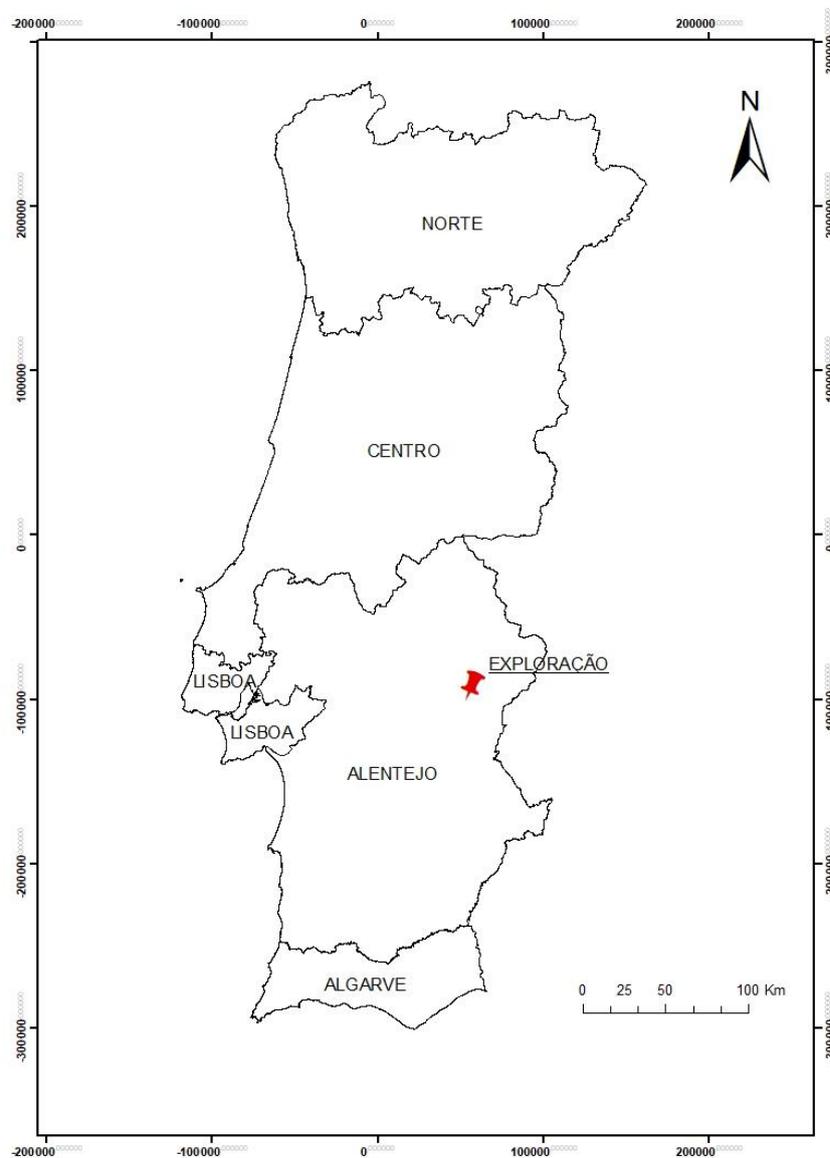


Figura 14 - Localização da exploração na região do Alentejo (ArcGIS Desktop, versão 10.6).

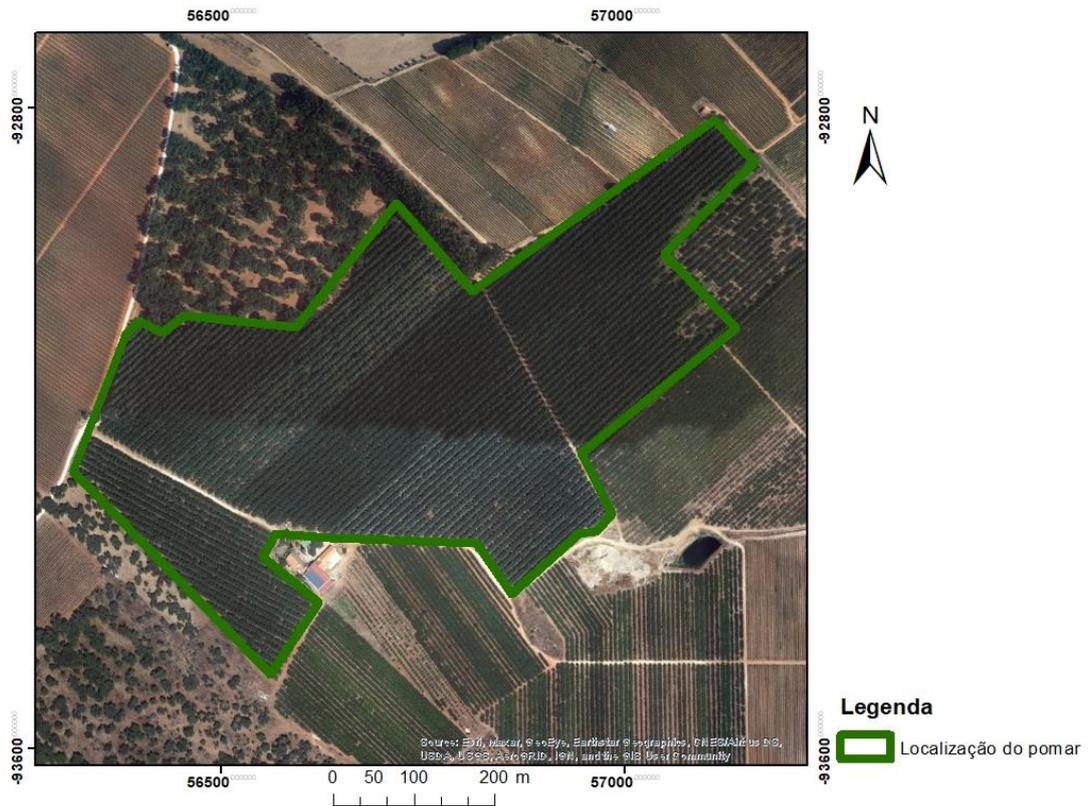


Figura 15 - Localização do pomar de nozeiras em estudo (linha verde) sobre uma imagem de satélite (RGB no visível) disponível no Basemap do programa ArcGIS Desktop versão 10.6.

3.2. Caracterização climática do local em estudo

Tendo por base a classificação de *Köppen*, pode-se afirmar que Portugal é caracterizado por um clima mediterrânico temperado. No entanto, apesar de o clima em Portugal ser tipicamente mediterrânico, este apresenta contrastes climáticos, tendo em conta as regiões Sul, Norte, Litoral e Interior. Como é possível observar na figura 16, a área em estudo é classificada como Csa, o que quer dizer que é um clima temperado com verão seco e quente, sendo que este tipo de clima tem aspetos próprios e evidentes, como é o caso do desfasamento entre a época de ocorrência de precipitação e a época de temperaturas para o desenvolvimento vegetal.

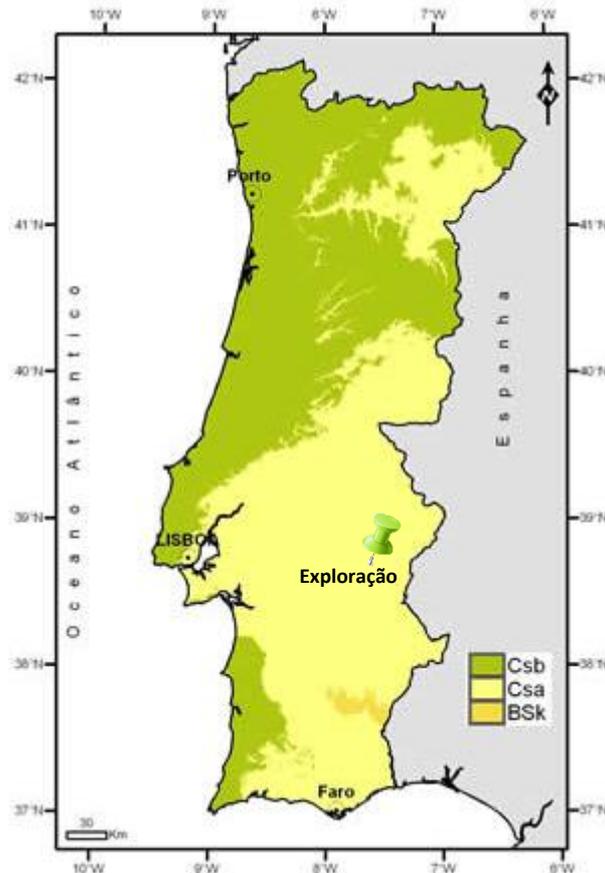


Figura 16 - Classificação climática segundo Köppen, em Portugal Continental (Adaptado de: Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2021).

Para esta caracterização climática, foram considerados os parâmetros temperatura do ar, precipitação, o número de dias de geadas mensais e horas de frio, registados na Estação Meteorológica de Évora (1971-2000), dado ser a estação meteorológica mais próxima da localização da exploração (Figura 17).

Pela observação da figura 17, verifica-se que a temperatura média anual é de 15,9°C, em que janeiro se apresenta como o mês mais frio, com uma média das temperaturas de 9,3°C, sendo o mês de agosto o que apresenta temperaturas mais elevadas, cuja média das temperaturas é 23,3°C. Relativamente às temperaturas médias anuais, quer as máximas quer as mínimas, estas tomam um valor de 20,7°C e 11,0°C, respetivamente. A média da quantidade de precipitação total anual é de 609,4 mm, tendo sido o mês de dezembro aquele que registou um maior valor, mais precisamente 102,7 mm, e o mês de agosto o que assinalou um menor valor, tendo sido de 6,6 mm.

Assim, o clima desta região é caracterizado como um clima seco, sendo que este fenómeno é mais acentuado entre os meses de junho e setembro.

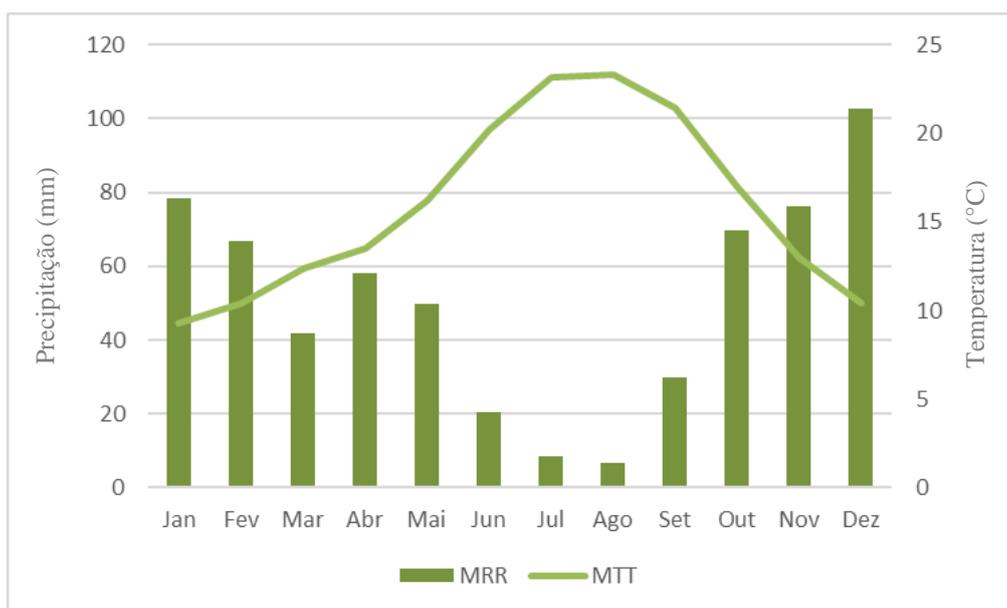


Figura 17 - Gráfico termopluviométrico de 1971-2000, da Estação Meteorológica de Évora. (MRR – Média Precipitação Total MTT – Média da Temperatura Média)

De acordo com o quadro 5, verifica-se que existe um baixo número de ocorrência de geadas, ocorrendo estas entre os meses de outubro e março, sendo dezembro o mês que representa o maior número de dias de geadas. Deste modo, a ocorrência de geadas ronda os dez dias por ano.

Quadro 5 - Número de dias de geada mensais (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2021).

Mês	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
Dias de Geada	1,9	0,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,6	4,9

Segundo Mendes (1983) o valor relativo às horas de frio (< 7°C) observado, referente à mediana, do local da exploração é de 600 horas de frio anuais (Figura 18).



Figura 18 - Mapa da distribuição do número de horas de frio entre outubro-abril em Portugal Continental (Mendes, 1983).

3.3. Caracterização edáfica do local em estudo

Para esta caracterização, recorreu-se à Carta de Solos de Portugal N.º36-B na escala de 1/50 000, de modo a identificar os solos da exploração (Figura 19) e ao livro de Cardoso (1965) para a classificação dos mesmos. O local em estudo, localiza-se numa zona onde predominam os seguintes tipos de solos:

- Vcc - Solos Mediterrâneos Vermelhos ou Amarelos de calcários cristalinos ou mármoreos ou rochas cristalofílicas cálcio-siliciosas

- Horizonte A1 - 20 a 30 cm; vermelho-escuro ou castanho-avermelhado; franco, por vezes franco-argiloso; estrutura granulosa ou grumosa fina moderada; friável; pH 6,5 a 7,5.

Transição gradual para

- Horizonte B - 15 a 50 cm (pode ter fraco desenvolvimento ou estender-se até grande profundidade ao longo de fendas ou bolsas); ligeiramente mais vermelho que o anterior; franco-argiloso a argiloso; estrutura semelhante à do anterior, mas um pouco mais grosseira (às vezes anisforme); há minúsculas concreções ferruginosas e algumas películas de argila nas faces dos agregados; friável e firme; pH 6,5 a 7,5.

Transição irregular e abrupta para

- Horizonte Cca C - Película em geral muito delgada de cor amarelada envolvendo os blocos da rocha-mãe.
 - Horizonte R - Rocha - mãe: calcários cristalinos ou mármore ou rochas cristalofílicas cálcio-siliciosas.
- Arc - Afloramentos Rochosos de calcários ou dolomias

Nota: Refere-se ainda que, existe uma mancha de solo formada pelo complexo Vcc + Arc.

- Pv – Solos Mediterrâneos Vermelhos ou Amarelos de rochas cristalofílicas básicas
 - Horizonte A1 - 15 a 30 cm; pardo-avermelhado, castanho-avermelhado ou vermelho; franco-argiloso ou, por vezes, franco; estrutura granulosa fina a média moderada a forte; friável; pH 5,5 a 7,0.

Transição nítida para

- Horizonte B - 10 a 40 cm; vermelho, vermelho-escuro ou castanho-avermelhado; argiloso; estrutura subangulosa fina ou média moderada a forte; há algumas películas de argila nas faces dos agregados; firme; pH 5,5 a 7,0.

Transição gradual para

- Horizonte C – Material originário: mistura de material semelhante ao do horizonte anterior com fragmentos de rocha, fazendo transição para a rocha-mãe (rochas cristalofílicas básicas).

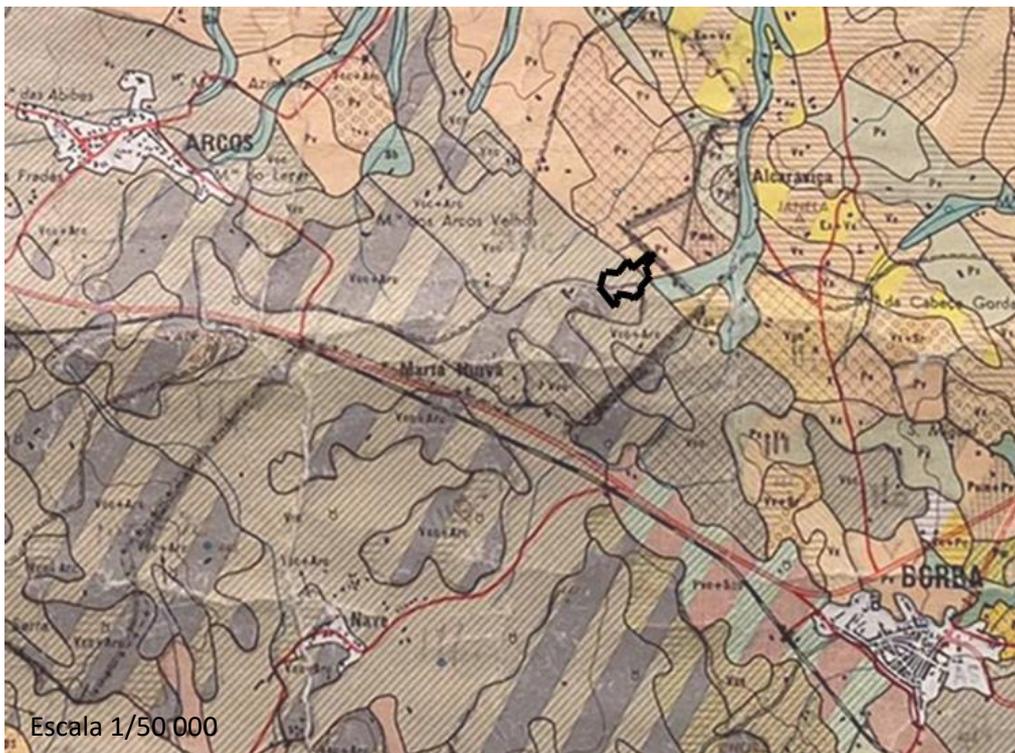


Figura 19 - Delimitação da exploração na carta de solos.

3.4. Caracterização do pomar do local em estudo

O pomar de noqueiras é constituído pelas variedades *Chandler*, *Lara*, *Tulare*, com um compasso de 5 x 8 m e *Howard*, com um compasso 4 x 8 m (Figura 20). As variedades mencionadas anteriormente são exclusivamente produtoras. Porém, uma vez que a noqueira é uma espécie monoica com acentuada dicogamia, são utilizadas as variedades *Franquette* e *Fernette*, de modo a auxiliar na polinização.

A área que representa cada variedade é a seguinte:

- *Chandler*: 13,24 ha;
- *Howard*: 1,72 ha;

- *Lara*: 2,65 ha;

- *Tulare*: 7,63 ha.

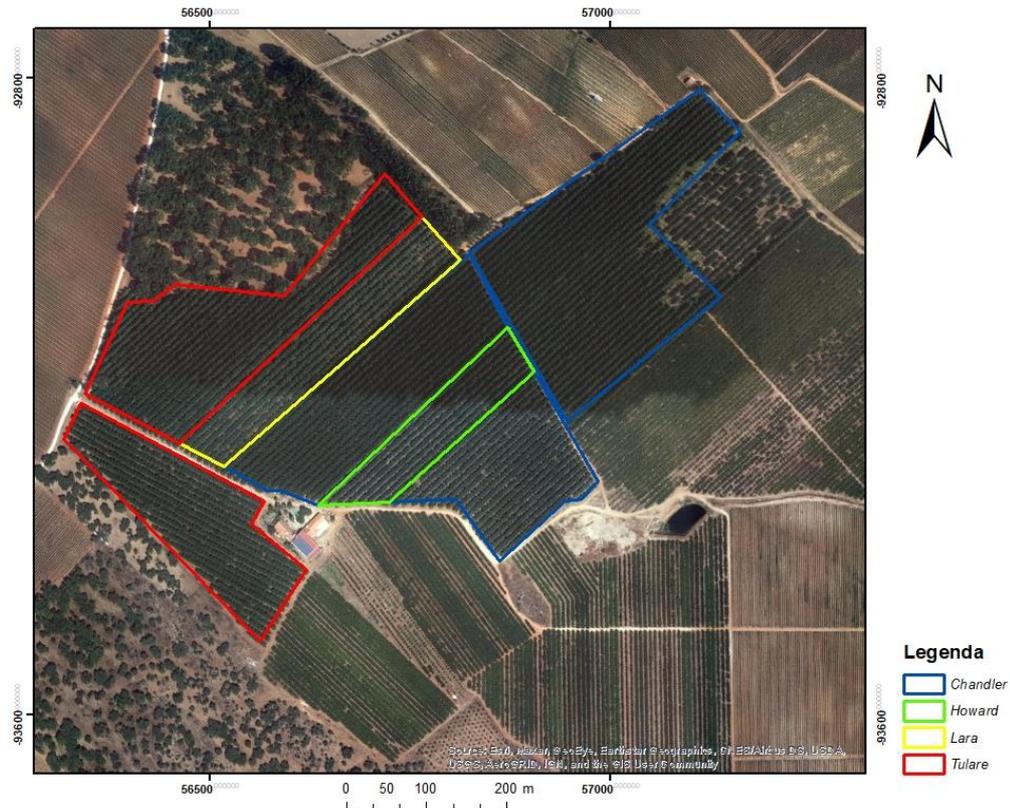


Figura 20 - Localização das variedades de nozeiras no pomar em estudo (linhas de cores por variedade) sobre uma imagem de satélite (RGB no visível) disponível no Basemap do programa ArcGIS Desktop versão 10.6.

Descrição das características das variedades de nozeiras presentes na exploração:

- **Chandler** – Variedade obtida através de um programa de melhoramento genético, no Estado da Califórnia – EUA, em 1963. É uma árvore de porte médio e semiaberto. Responde muito bem a tipos de cultivo superintensivo, embora também se obtenha uma boa produção em tipos de cultivo intensivos. A rebentação desta variedade varia de acordo com as condições climáticas locais, bem como das horas de frio verificadas em cada ano. A floração masculina ocorre entre a segunda e a quarta semana de abril e a floração feminina ocorre entre a segunda quinzena de abril e a primeira quinzena de maio. A colheita ocorre em outubro. O potencial produtivo desta variedade é muito elevado devido não só ao seu vigor como também ao facto de 90% da sua frutificação

ser lateral. A sua casca é de rugosidade média e muito fina, o que facilita o processo de separação da casca, e a semente é de cor muito clara.

- **Howard** – Esta variedade é muito apreciada pela qualidade dos seus frutos, pela sua produtividade e pela precocidade da data de colheita, ocorrendo a mesma em outubro, sendo esta uma grande vantagem para a sua comercialização. A *Howard* gosta de solos profundos e bem drenados, é uma árvore de vigor pequeno-médio, sendo recomendada para plantações superintensivas. A rebentação desta variedade varia de acordo com as condições climáticas locais, bem como das horas de frio verificadas em cada ano. A floração masculina ocorre entre a segunda e a terceira semana de abril e a floração feminina ocorre entre a segunda e a quarta semana de abril. É de salientar que esta variedade precisa de cerca de 800 horas de frio. Devido ao seu vigor e aos 90% de frutificação lateral implica que o seu potencial produtivo seja muito alto. A casca é de rugosidade média e a semente é grande e de cor clara, e possui um alto rendimento.
- **Lara** – É uma variedade francesa de vigor médio com um porte semiereto a semiaberto e apresenta muitas flores. A floração masculina ocorre entre a segunda e a terceira semana de abril e a floração feminina ocorre entre a segunda quinzena de abril e a primeira semana de maio. A colheita ocorre em outubro. Entra rapidamente em produção, frutificando em ramos laterais, apresentando elevada produtividade. O fruto é redondo com casca sólida e de calibre muito elevado. O rendimento do miolo é de 52%. O fruto pode ser utilizado para diversos fins, como em noz fresca e em noz seca, por exemplo. Esta variedade deve ser plantada em zonas onde não ocorram geadas tardias, em solos ricos e bem preparados.
- **Tulare** – Esta variedade é vigorosa, muito produtiva, com rápida entrada em produção. A floração masculina ocorre durante a primeira quinzena de abril e a floração feminina ocorre entre a primeira e a terceira semana de abril. A colheita ocorre em outubro. Os frutos são de casca clara e de fácil descasque.

3.5. Imagens do satélite Sentinel-2

As datas de passagem do satélite Sentinel-2 que se consideraram para o estudo foram 6 datas diferentes (Quadro 7). O conjunto de imagens do satélite Sentinel-2 foram adquiridas através da plataforma *Copernicus Open Access Hub* (European Space Agency, 2021), com a periodicidade de 15 dias e sem cobertura de nuvens. As imagens obtidas foram processadas no programa *ArcGIS Desktop* versão 10.6, sendo o primeiro passo a sua reprojeção do sistema de projeção GCS_WGS_1984 para o sistema de coordenadas Hayford-Gauss – Militar (ETRS_1989_Portugal_TM06). As recolhas de amostras de campo foram realizadas nos dias seguintes à aquisição das imagens.

3.6. Seleção dos pontos de amostragem

Os pontos de amostragem foram selecionados com base nos valores da banda do IVP (banda 8), sendo que a seleção da banda 8 justifica-se por ser a banda mais sensível e, por isso, a região do EEM associada à presença de alguns compostos orgânicos que se tentam avaliar, sendo também a banda mais utilizada e onde se verifica uma maior variabilidade. Para esta banda procedeu-se à sua reclassificação em 10 classes por forma a identificar as diferentes zonas de variabilidade. A seleção dos pontos de amostragem foi efetuada tendo em conta as zonas resultantes desta reclassificação, as variedades presentes no pomar e a capacidade para se executarem as técnicas analíticas dos métodos de referência nas amostras recolhidas.

Dado que se pretende encontrar modelos de predição, os pontos foram selecionados também de acordo com a segmentação da amostra, de modo a obter-se a maior variabilidade possível, uma vez que a inclusão de variabilidade é uma vantagem na obtenção de modelos deste tipo.

Assim, é de salientar que nas diferentes datas em que se realizou o estudo, a localização dos pontos amostrados, na maioria das vezes, foi diferente e esta foi selecionada conforme a segmentação da imagem obtida para a data de recolha, de modo a obter-se, tal como já foi referido, uma maior variabilidade.

No quadro 6 estão mencionados o número de pontos de amostragem de cada variedade, de todas as datas.

Quadro 6 - Número de pontos de amostragem observados em cada variedade, por data.

Variedade	04/05/2021	03/06/2021	23/06/2021	23/07/2021	12/08/2021	21/09/2021
<i>Chandler</i>	8	8	8	6	6	4
<i>Howard</i>	3	3	3	3	2	1
<i>Lara</i>	3	4	3	3	2	2
<i>Tulare</i>	4	4	4	4	4	3

Os pontos de amostragem relativos à data de 4 de maio de 2021 podem ser observados na figura 21. Nos anexos I, II, III, IV e V é possível observar os pontos de amostragem relativos às restantes datas de recolha de amostras.

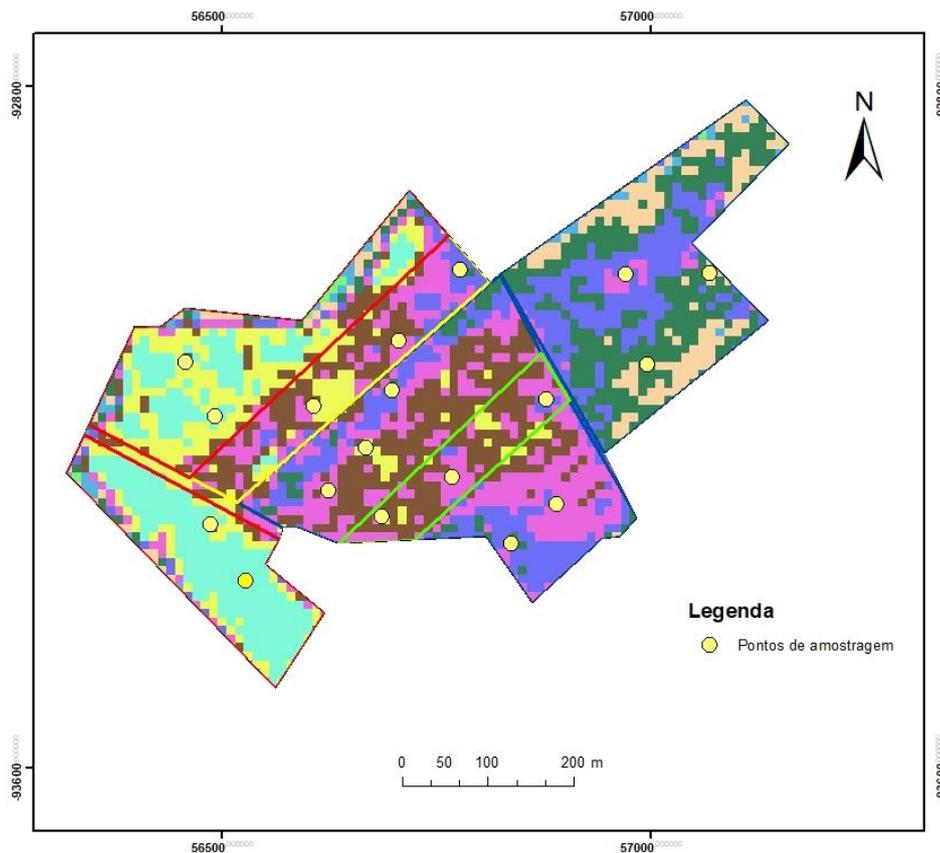


Figura 21 - Pontos de amostragem da data de 4 de maio de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).

3.7. Recolha de amostras

A recolha das amostras foi realizada com base nos *pixels* previamente selecionados, e com o recurso ao programa *ArcGIS Desktop* versão 10.6, identificaram-se as coordenadas, as quais foram utilizadas para marcar os pontos no terreno. As árvores das parcelas em estudo, onde se procedeu à recolha das amostras foram marcadas com fita refletora, de modo a ser mais fácil identificá-las numa posterior ida ao campo, no caso desses pontos serem incluídos na amostragem seguinte.

De cada árvore recolheu-se o folíolo terminal de 9 folhas à volta da copa, formando uma amostra composta. Em seguida procedeu-se à liofilização e à determinação do peso seco da amostra. Posteriormente, as amostras foram moídas no moinho, com um crivo de 1 mm.

Apenas foram recolhidas amostras de uma árvore e não das árvores em redor dessas, pois a área de amostragem poderia não coincidir com o valor do *pixel* fornecido pelo satélite Sentinel-2. O erro de georreferenciação das imagens é baixo, permitindo fazer a correspondência *pixel*/árvore com um grau de certeza elevado.

As datas em que ocorreu a recolha de amostras estão apresentadas no quadro 7.

Quadro 7 - Datas das imagens de satélite e da recolha de amostras.

Amostra	Data das imagens de satélite	Data da recolha de amostras
1	04/05/2021	05/05/2021
2	03/06/2021	04/06/2021
3	23/06/2021	25/06/2021
4	23/07/2021	26/07/2021
5	12/08/2021	13/08/2021
6	21/09/2021	23/09/2021

3.8. Recolha de espectros

De cada amostra seca e moída foram recolhidos 6 espectros de IVP usando um espectrómetro FT-NIR (MPA, *Bruker Optik GmbH, Germany*), com uma gama espectral entre os 12500 – 4000 cm^{-1} . Os espectros foram recolhidos em refletância difusa, à

temperatura ambiente de 20°C, utilizando-se uma célula cilíndrica de fundo plano com um diâmetro de 2 cm. Cada espectro resultou da média de 32 leituras por amostra, recolhidas com uma velocidade de 10 kHz e uma resolução ótica de 16 cm⁻¹, o espectro de absorção foi obtido a partir da função: $\log (1/R)$, sendo o R o valor da refletância difusa. Cada espectro é constituído por 1154 pontos.

O programa utilizado para a recolha e para o processamento dos espectros foi o *Opus* versão 7.5 (*Bruker Optik GmbH, Germany*).

3.9. Determinação do teor de azoto presente nas folhas

Para a determinação do teor de N nas folhas, recorreu-se ao método de Dumas, utilizando-se o equipamento *Leco FP-528*, onde foram pesados, aproximadamente, 0,12 g de amostra moída que, posteriormente, sofreu combustão a 750°C, na presença de oxigénio e hélio (Figura 22). Devido a este processo, ocorreu a passagem do N para o estado gasoso, onde é identificado através de um detetor de condutividade térmica.

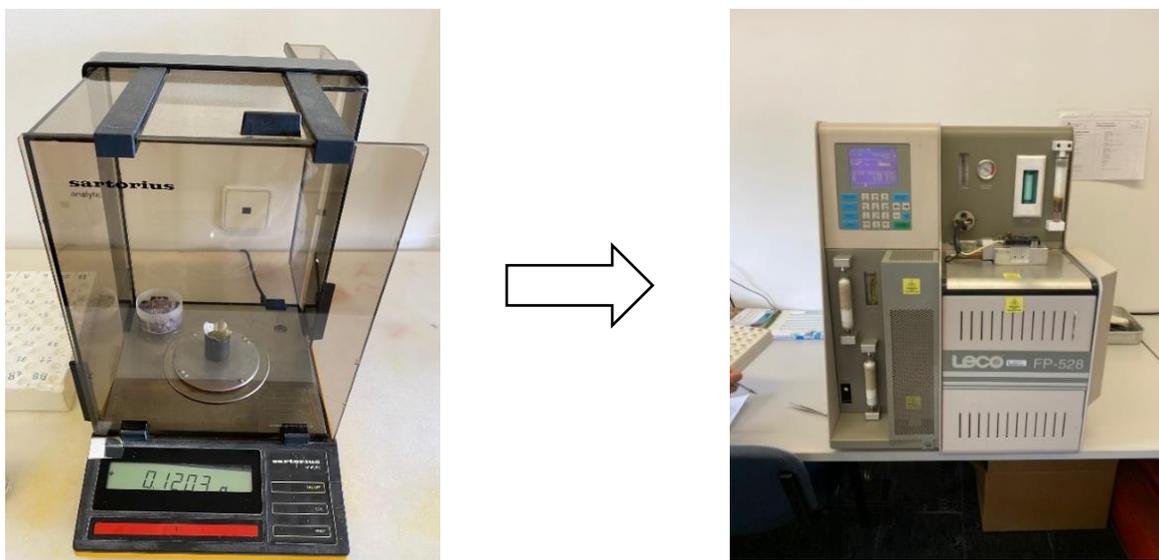


Figura 22 - Metodologia para a determinação do azoto presente nas folhas.

3.10. Determinação do teor de cálcio e de potássio presente nas folhas

3.10.1. Digestão ácida

Para a determinação do teor de Ca e de K nas folhas (Figura 23), pesaram-se, em duplicado, aproximadamente 0,2 g das amostras de material vegetal, com o recurso a uma balança de precisão. Estes, por sua vez, foram levados à mufla a 600°C durante 24 horas, de modo a se obterem as cinzas.

Depois da inceneração adicionaram-se às cinzas obtidas, 10 ml de HCl a 0,5 N, filtrando-se em filtros de papel *Whatman* (Ashless) para um balão volumétrico de 50 ml, aferindo-se o volume com água destilada.

A quantificação de ambos os cátions por espectrofotometria de absorção atômica foi executada num equipamento *PerkinElmer Atomic Absorption Spectrometer* (PinAAcle 900T). Para a quantificação do cátion Ca, transferiu-se 1 ml da amostra obtida do processo anteriormente descrito e adicionaram-se 2,5 ml de lantânio (agente que elimina as interferências da amostra) para um balão volumétrico de 50 ml e, posteriormente, completou-se o seu volume com água destilada. Para a quantificação do cátion K, diluiu-se 1 ml do extrato obtido anteriormente para um balão volumétrico de 20 ml e, de seguida, aferiu-se o seu volume com água destilada.

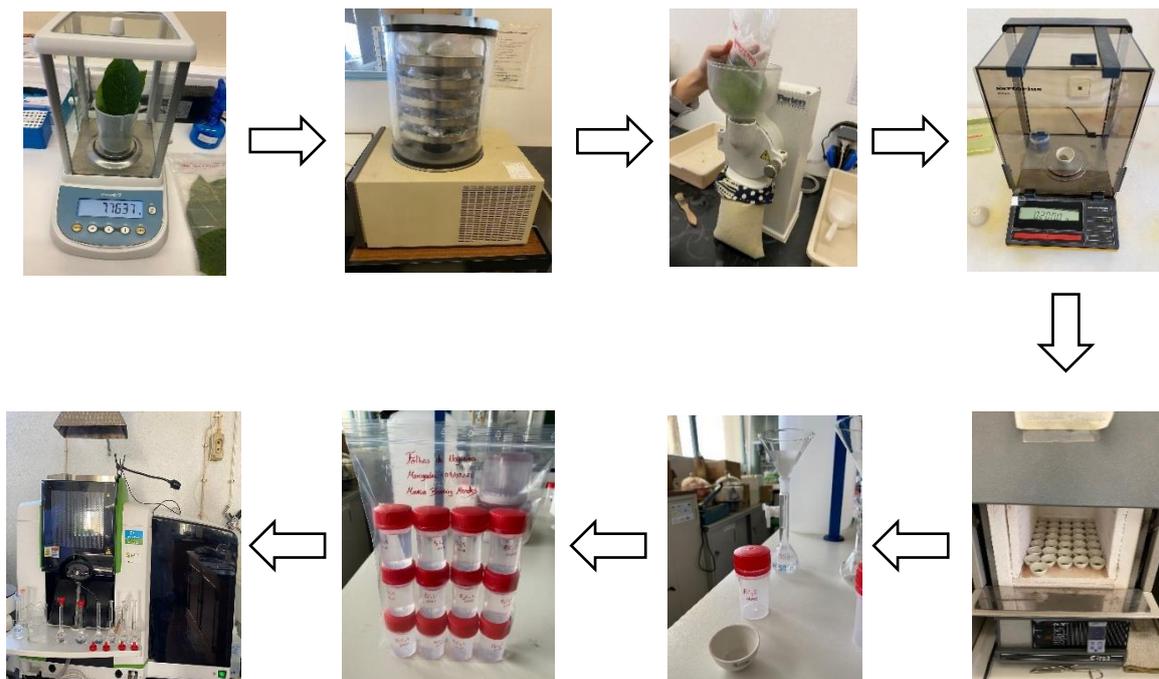


Figura 23 - Metodologia para a determinação do cálcio e do potássio presente nas folhas.

3.11. Procedimento para a obtenção do modelo final com base nos dados do satélite Sentinel-2

Com vista a concretizar o objetivo deste trabalho, desenvolveram-se modelos de predição com base na leitura remota das diferentes bandas originais do satélite Sentinel-2 e dos índices (NDVI e NDWI), de modo a verificar se é possível determinar os teores dos diferentes nutrientes num pomar de nogueiras. Desta forma, para a obtenção dos diferentes modelos houve a necessidade de cumprir várias etapas:

- 1) Através das imagens de satélite e com recurso ao programa *ArcGIS Desktop* versão 10.6, para cada ponto de amostragem e para cada data calculou-se os índices NDVI (Equação 2) e NDWI (Equação 3).

Para cada banda e IVs, foi retirado o valor do *pixel* de cada ponto de amostragem. Para as bandas de resolução espacial de 20 m (b5, b6, b7, b11 e b12), procedeu-se à sua reamostragem para 10 m utilizando o algoritmo do vizinho mais próximo.

Foram então considerados os valores de cada banda e dos índices, NDVI e NDWI, de todos os *pixels* para todos os pontos de amostragem e para cada data da recolha de amostras.

- 2) Para cada nutriente obtiveram-se os valores pelos métodos de referência descritos anteriormente (3.9. e 3.10.). Relativamente aos valores de N, Ca e K obtidos na última data de recolha de amostras (23/09/2021) estes, resultaram do desenvolvimento de um modelo quimiométrico com base nos espectros recolhidos no espectrómetro FT-NIR. Neste caso, os modelos de calibração e validação foram obtidos com o recurso ao algoritmo de regressão dos mínimos quadrados parciais (PLSR, *Partial Least Squares Regression*), e recorreu-se a uma validação cruzada como método de validação. Neste processo de validação não existe um conjunto de amostras independentes, cada amostra é validada com as restantes, recorrendo a um método conhecido como «leave one out» (Ferreira, 2018). Em espectroscopia do IVP é habitual utilizar-se o termo de modelo de calibração em vez de modelo de predição, porque na realidade neste tipo de espectroscopia está-se a calibrar um equipamento para a leitura de amostras.

- 3) Utilizou-se a regressão linear múltipla (MLR, *Multiple Linear Regression*) como técnica estatística para a obtenção de modelos de predição das variáveis resposta (valores de referência recolhidos de todos os *pixels* selecionados e de todas as datas, para os teores de N, Ca e K) a partir das variáveis independentes ou preditoras (informação espectral do satélite Sentinel-2, ou seja, os valores das bandas e dos IVs). Previamente à construção dos modelos observou-se a estrutura dos dados recorrendo-se à análise de componentes principais (PCA, *Principal Component Analysis*). Desta forma, pretende-se desenvolver modelos que permitam estimar o teor de nutrientes das árvores com base nos dados obtidos por satélite. O programa utilizado para a obtenção destes modelos de estimação dos nutrientes na cultura foi o *Unscrambler X* versão 10.5.1.

Para a avaliação da qualidade dos modelos obtidos em 2) e em 3) utilizaram-se alguns parâmetros estatísticos tais como o coeficiente de determinação (R^2), que determina a extensão da variância da variável dependente que pode ser explicada pela variável independente, sendo que este parâmetro pode ser utilizado como indicador de ajuste do modelo. O desvio residual do modelo de predição (RPD, *Residual Prediction Deviation*) que é a razão entre o desvio padrão (DP) dos valores obtidos pelo método de referência e o erro médio obtido pelo modelo de predição. Tal como sugere Conzen (2014), este índice é geralmente usado como indicador de qualidade do modelo de predição, sendo que valores de RPD entre 2.5-3 significam que o modelo pode ser utilizado para uma triagem grosseira; superiores a 3 significa que o modelo é adequado para triagem; superiores a 5 o modelo pode ser utilizado para o controlo de qualidade e superiores a 8 o método é excelente para qualquer tipo de avaliação da qualidade. A raiz quadrada do erro médio do modelo de predição (RMSE, *Root Mean Squared Error*) é outro dos parâmetros utilizados para a avaliação da qualidade do modelo.

Foram utilizados 2 critérios para a determinação dos *outliers*: foi estabelecido o limite superior e inferior com base na distribuição de *Hotelling's*, rejeitaram-se as amostras que excediam esses limites. Recorreu-se também à distribuição residual como critério para a remoção dos *outliers*. Para a determinação dos *outliers* utilizou-se um nível de significância de 5%.

4. Resultados e Discussão

A análise dos resultados permite dar resposta aos objetivos do presente estudo. Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos após a implementação dos métodos e abordagens explicitadas no capítulo anterior.

4.1. Determinação do azoto, cálcio e potássio no material vegetal através da espectroscopia FT-NIR

Estes resultados dizem respeito à quantificação do N no material vegetal seco e moído. Este método foi usado em complemento do método de referência para determinar o N da última data de recolha de amostras. Após a análise de todo o conjunto de amostras foram usadas técnicas de quimiometria pelo programa *Opus* versão 7.5 para construção de um modelo através do método PLSR, com 6 fatores (*Rank*), utilizado na previsão dos níveis de N no material vegetal.

Para o desenvolvimento deste modelo foram consideradas 85 amostras e, a partir deste modelo foram determinados os níveis de N de 10 amostras, correspondendo estas à última data de recolha.

A qualidade do modelo de calibração pode ser observada na figura 24. Nesta figura observa-se a correlação entre o valor da percentagem de N determinado pelo método de referência e o valor da percentagem de N determinado pelo modelo quimiométrico, retirando os *outliers* (2 amostras).

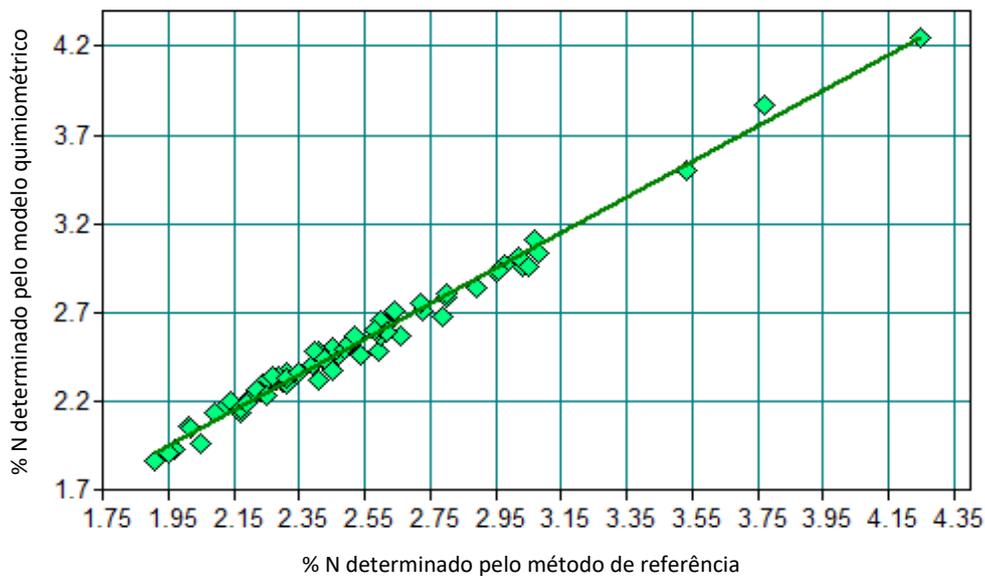


Figura 24 - Retas de calibração obtida pelo modelo PLSR para a previsão dos níveis de azoto na matéria seca das folhas (Opus, versão 7.5).

Os parâmetros obtidos para o modelo de calibração e validação encontram-se apresentados no quadro 8. Ambos os modelos, calibração e validação, apresentam R^2 elevados, respetivamente, 0,99 e 0,98, o que indicam ser excelentes modelos quantitativos de calibração, conforme descrito por Sayes *et al.* (2005). Quanto ao parâmetro RPD, este apresenta um valor de 7,33, podendo este modelo ser utilizado para qualquer tipo de avaliação de qualidade, sendo considerada excelente a sua qualidade (Conzen, 2014). Relativamente ao RMSE, este apresenta valores baixos para os dois modelos, calibração e validação, 0,051 e 0,056, respetivamente. No mesmo sentido, Petisco *et al.* (2005), Riley & Canaves (2002) e Lequeue *et al.* (2016) conseguiram uma calibração robusta através de um FT-NIR para estimar o conteúdo de N em amostras de folhas de várias espécies lenhosas, em folhas de planta de algodão e em folhas de tomateiro, respetivamente, sendo de salientar que obtiveram melhores resultados usando PLSR, método este também utilizado no presente estudo.

Quadro 8 - Parâmetros estatísticos dos modelos de calibração e validação obtidos através do programa *Opus* versão 7.5 (Bruker Optik GmbH, Germany) para a determinação do azoto na matéria seca das folhas.

Modelos obtidos (Processamento dos espectros)	R²	RPD	RMSE
Modelo de calibração			
(1ª derivada + variação de padrão normal (SNV))	0,99	-	0,051
Modelo de validação cruzada			
(1ª derivada + variação de padrão normal (SNV))	0,98	7,33	0,056

Estes resultados dizem respeito à quantificação do Ca no material vegetal seco e moído. Este método foi usado em complemento do método de referência para determinar o Ca da última data de recolha de amostras. Após a análise de todo o conjunto de amostras foram usadas técnicas de quimiometria pelo programa *Opus* versão 7.5 para construção de um modelo através do método PLSR, com 8 fatores (*Rank*), utilizado na previsão dos níveis de Ca no material vegetal recolhido no campo.

Para o desenvolvimento deste modelo foram consideradas 85 amostras e, a partir deste modelo foram determinados os níveis de Ca de 10 amostras, correspondendo estas à última data de recolha.

A qualidade do modelo de calibração pode ser observada na figura 25. Nesta figura observa-se a correlação entre o valor da percentagem de Ca determinado pelo método de referência e o valor da percentagem de Ca determinado pelo modelo quimiométrico, retirando os *outliers* (3 amostras).

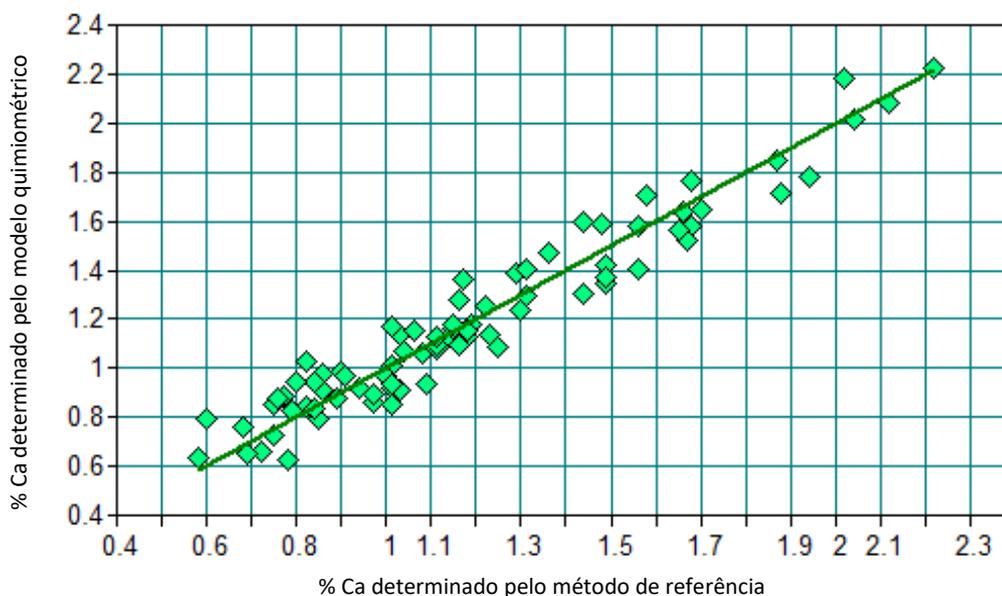


Figura 25 - Retas de calibração obtida pelo modelo PLSR para a previsão dos níveis de cálcio na matéria seca das folhas (Opus, versão 7.5).

No quadro 9 estão apresentados os parâmetros obtidos para o modelo de calibração e validação. Os dois modelos (calibração e validação), apresentam um R^2 elevado, respectivamente, 0,93 e 0,90. No que se refere ao parâmetro RPD, este apresenta um valor de 3,12, deste modo, este modelo é adequado para triagem (Conzen, 2014). Quanto ao parâmetro RMSE, tanto no modelo de calibração como no modelo de validação apresenta valores baixo, respectivamente, 0,104 e 0,122, quando comparados com os valores obtidos por Dutra (2018) no Ca presente nas fezes de caprinos em pastagens naturais através de um equipamento FT-NIR FOSS 500. Dado os equipamentos utilizados serem semelhantes, no presente estudo e no estudo referido anteriormente, a diferença pode ser justificada dado o facto de o volume de amostras no presente estudo ser superior ao número de amostras analisadas nas fezes de caprinos. Outros trabalhos têm referido esta técnica como fiável para a determinação de Ca, nomeadamente a potencialidade do equipamento FT-NIR para determinar o teor de Ca na parede celular de morangos (Tufik, 2017).

Quadro 9 - Parâmetros estatísticos dos modelos de calibração e validação obtidos através do programa *Opus* versão 7.5 (Bruker Optik GmbH, Germany) para a determinação do cálcio na matéria seca das folhas.

Modelos obtidos	R²	RPD	RMSE
(Processamento dos espectros)			
Modelo de calibração			
(1ª derivada + variação de padrão normal (SNV))	0,93	-	0,104
Modelo de validação cruzada			
(1ª derivada + variação de padrão normal (SNV))	0,90	3,12	0,122

Estes resultados dizem respeito à quantificação do K no material vegetal seco e moído. Este método foi usado em complemento do método de referência para determinar o K da última data de recolha de amostras. Após a análise de todo o conjunto de amostras foram usadas técnicas de quimiometria pelo programa *Opus* versão 7.5 para construção de um modelo através do método PLSR, com 10 fatores (*Rank*), utilizado na previsão dos níveis de K no material vegetal recolhido no campo.

Para o desenvolvimento deste modelo foram consideradas 85 amostras e, a partir deste modelo foram determinados os níveis de K de 10 amostras, correspondendo estas à última data de recolha.

A qualidade do modelo de calibração pode ser observada na figura 26. Nesta figura observa-se a correlação entre o valor da percentagem de K determinado pelo método de referência e o valor da percentagem de K determinado pelo modelo quimiométrico, retirando os *outliers* (5 amostras).

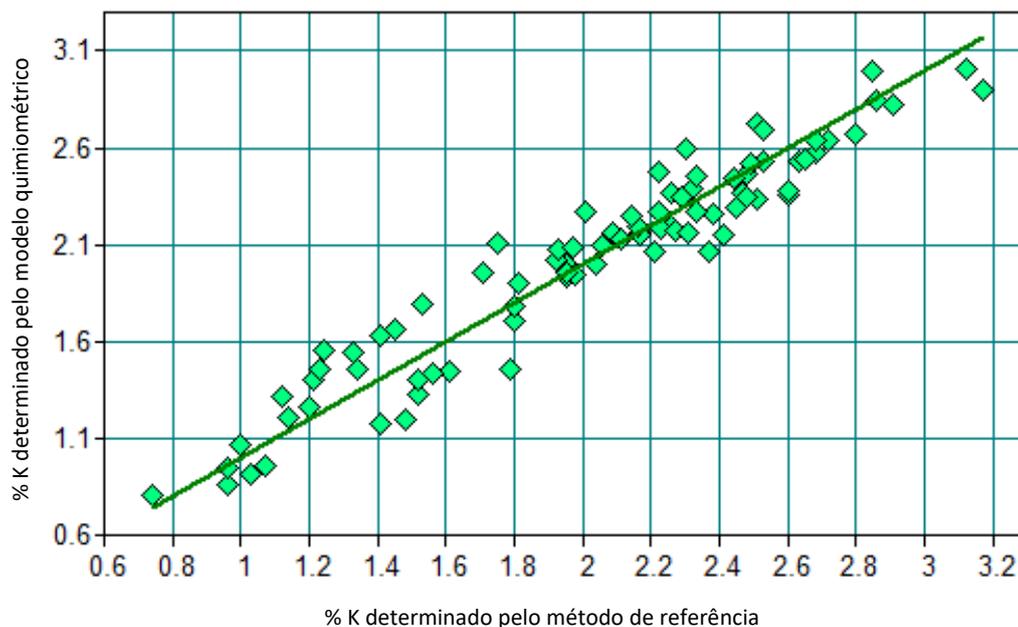


Figura 26 - Retas de calibração obtidas pelo modelo PLSR para a previsão dos níveis de potássio na matéria seca das folhas (Opus, versão 7.5).

Os parâmetros obtidos para o modelo de calibração e validação encontram-se apresentados no quadro 10. Segundo a classificação de Sayes *et al.* (2005), o modelo de calibração apresenta um R^2 excelente (0,92), enquanto que o modelo de validação apresenta um R^2 bom (0,84). Em relação ao parâmetro RPD, este apresenta um valor de 2,53, o que significa que o modelo pode ser utilizado para uma triagem grosseira (Conzen, 2014). No que se refere ao parâmetro RMSE, este apresenta valores baixos tanto para o modelo de calibração, como para o modelo de validação, com valores de 0,168 e 0,222, respectivamente. No âmbito das Ciências Agrárias não existem referências relativamente à utilização da espectroscopia de IVP para a determinação do K em material vegetal, no entanto em Ciências Farmacêuticas existem modelos para a qualidade de medicamentos baseados na quantificação de K, tendo se obtido modelos que podem ser empregues como alternativa na dosagem deste nutriente (Souza & Ferrão, 2006).

Quadro 10 - Parâmetros estatísticos dos modelos de calibração e validação obtidos através do programa Opus versão 7.5 (Bruker Optik GmbH, Germany) para a determinação do potássio na matéria seca das folhas.

Modelos obtidos	R²	RPD	RMSE
(Processamento dos espectros)			
Modelo de calibração			
(1ª derivada + variação de padrão normal (SNV))	0,92	-	0,168
Modelo de validação cruzada			
(1ª derivada + variação de padrão normal (SNV))	0,84	2,53	0,222

A utilização da espectroscopia FT-NIR para a avaliação dos nutrientes em material vegetal é uma técnica muito utilizada e permite agilizar a determinação do conteúdo do nutriente em causa nas amostras vegetais. No entanto, um dos requisitos para o sucesso da aplicação desta técnica é a existência de amostras distribuídas num intervalo de valores relativamente amplo. Neste caso, observou-se para cada nutriente, em estudo, os intervalos de valores apresentavam uma amplitude considerável (Quadro 11).

A espectroscopia FT-NIR é uma técnica analítica de determinação rápida que evita os processamentos longos e dispendiosos das amostras, permitindo a obtenção de informação acerca da composição química das amostras rapidamente.

Quadro 11 – Valor médio, desvio padrão e intervalo de valores do teor de nutrientes em percentagem (N, Ca, K) nas folhas de noqueira.

Data	Variedade	Nº de amostras	N (%)		Ca (%)		K (%)	
			Med. ± DP	Int.	Med. ± DP	Int.	Med. ± DP	Int.
04/05/2021	<i>Chandler</i>	8	3,00 ± 0,17	2,59 – 3,08	0,83 ± 0,12	0,72 – 1,01	2,44 ± 0,38	1,93 – 3,17
04/05/2021	<i>Howard</i>	3	3,77 ± 0,66	2,95 – 4,25	0,85 ± 0,05	0,82 – 0,91	2,85 ± 0,36	2,23 – 2,86
04/05/2021	<i>Lara</i>	3	2,41 ± 0,06	2,39 – 2,50	0,68 ± 0,13	0,58 – 0,84	2,29 ± 0,11	2,16 – 2,38
04/05/2021	<i>Tulare</i>	4	3,01 ± 0,38	2,60 – 3,53	0,74 ± 0,21	0,60 – 1,09	2,26 ± 0,18	2,09 – 2,51
03/06/2021	<i>Chandler</i>	8	2,29 ± 0,22	2,09 – 2,79	1,06 ± 0,15	0,84 – 1,29	2,38 ± 0,46	1,24 – 2,63
03/06/2021	<i>Howard</i>	3	2,66 ± 0,12	2,49 – 2,72	0,90 ± 0,17	0,77 – 1,11	2,26 ± 0,24	2,01 – 2,49
03/06/2021	<i>Lara</i>	4	2,16 ± 0,18	2,01 – 2,43	1,31 ± 0,34	0,86 – 1,65	1,96 ± 0,22	1,80 – 2,33
03/06/2021	<i>Tulare</i>	4	2,60 ± 0,19	2,23 – 2,62	1,08 ± 0,31	1,01 – 1,66	2,22 ± 0,11	2,14 – 2,37
23/06/2021	<i>Chandler</i>	8	2,31 ± 0,18	2,12 – 2,73	1,21 ± 0,23	1,06 – 1,70	2,60 ± 0,52	1,34 – 3,12
23/06/2021	<i>Howard</i>	3	2,45 ± 0,16	2,30 – 2,62	1,01 ± 0,17	0,82 – 1,15	2,65 ± 0,29	2,33 – 2,91
23/06/2021	<i>Lara</i>	3	2,17 ± 0,14	2,02 – 2,30	1,48 ± 0,18	1,18 – 1,49	1,95 ± 0,07	1,92 – 2,06
23/06/2021	<i>Tulare</i>	4	2,47 ± 0,19	2,40 – 2,80	1,59 ± 0,35	1,30 – 1,94	2,24 ± 0,18	2,22 – 2,60
23/07/2021	<i>Chandler</i>	6	2,22 ± 0,15	2,05 – 2,47	1,19 ± 0,30	0,97 – 1,76	1,59 ± 0,31	0,96 – 1,81
23/07/2021	<i>Howard</i>	3	2,24 ± 0,02	2,20 – 2,25	0,94 ± 0,18	0,76 – 1,13	1,33 ± 0,30	1,12 – 1,71
23/07/2021	<i>Lara</i>	3	2,13 ± 0,05	2,09 – 2,19	0,91 ± 0,18	0,80 – 1,16	1,00 ± 0,37	0,74 – 1,48
23/07/2021	<i>Tulare</i>	4	2,40 ± 0,21	2,12 – 2,64	1,51 ± 0,44	1,13 – 2,12	1,48 ± 0,38	1,20 – 1,95
12/08/2021	<i>Chandler</i>	6	2,16 ± 0,17	1,97 – 2,42	1,78 ± 0,27	1,36 – 2,04	1,52 ± 0,30	1,14 – 1,98
12/08/2021	<i>Howard</i>	2	2,16 ± 0,12	2,08 – 2,25	1,52 ± 0,23	1,36 – 1,68	1,24 ± 0,24	1,07 – 1,41
12/08/2021	<i>Lara</i>	2	1,93 ± 0,03	1,91 – 1,95	1,42 ± 0,10	1,35 – 1,49	1,13 ± 0,14	1,03 – 1,23
12/08/2021	<i>Tulare</i>	4	2,56 ± 0,25	2,31 – 2,92	1,58 ± 0,49	1,03 – 2,22	1,32 ± 0,67	0,96 – 2,45
21/09/2021	<i>Chandler</i>	4	1,91 ± 0,12	1,77 – 2,01	1,87 ± 0,28	1,47 – 2,15	1,15 ± 0,54	0,56 – 1,89
21/09/2021	<i>Howard</i>	1	2,18	--	1,59	--	1,11	--
21/09/2021	<i>Lara</i>	2	1,59 ± 0,13	1,50 – 1,69	1,44 ± 0,35	1,20 – 1,69	0,92 ± 0,50	0,57 – 1,28
21/09/2021	<i>Tulare</i>	3	1,67 ± 0,16	1,57 – 1,88	1,40 ± 0,32	0,86 – 1,41	1,26 ± 0,64	0,68 – 1,96

Med. – média; DP – Desvio Padrão; Int. – intervalo de valores.

4.2. Determinação da importância relativa das diferentes variáveis em estudo

As variáveis em estudo, variáveis preditoras, para a obtenção dos modelos de estimação dos nutrientes da cultura com base na informação do satélite Sentinel-2 são as 9 bandas (bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11 e 12) e os 2 índices, NDVI e NDWI. Para verificar a importância relativa destas variáveis recorreu-se à técnica de PCA para identificar possíveis padrões nos dados (Santos, 2012), de modo a verificar a existência de variáveis que poderiam constar ou não no modelo final.

Com base nos resultados obtidos através da PCA, as componentes principais (*Principal Component*), PC-1 e PC-2, explicam 56% e 35% da variação total dos dados, respetivamente, formando juntos 91%, o que está de acordo com o citado por Rencher (2002), em que pelo menos 70% da variação total deve ser explicada pela primeira e pela segunda componentes principais. Pela observação da figura 27, é visível distinguir três grupos distintos, com importância semelhante entre si. Dado o facto de todas as variáveis se encontrarem no espaço entre as duas elipses, indicam que contribuem entre 50 a 100% para a variabilidade total do sistema. Nenhuma destas variáveis foi removida na construção dos modelos, porque todas têm capacidade discriminatória, tendo então os modelos sido construídos com base nas 11 variáveis em estudo.

Conforme descrito por Alexandris *et al.* (2017), a PCA exige uma normalização das variáveis quando estas apresentam grandezas numéricas muito diferentes. Este tipo de análise é sensível à escala relativa das variáveis originais e representa uma redução da dimensionalidade dos dados incluindo o máximo de variância da amostra. O facto de haver variáveis com grandezas muito diferentes vai condicionar o cálculo das componentes principais. Neste caso, para executar a normalização dos dados, dividiu-se para cada amostra, o valor do *pixel* de cada banda em todas as datas de amostragem, pelo respetivo DP.

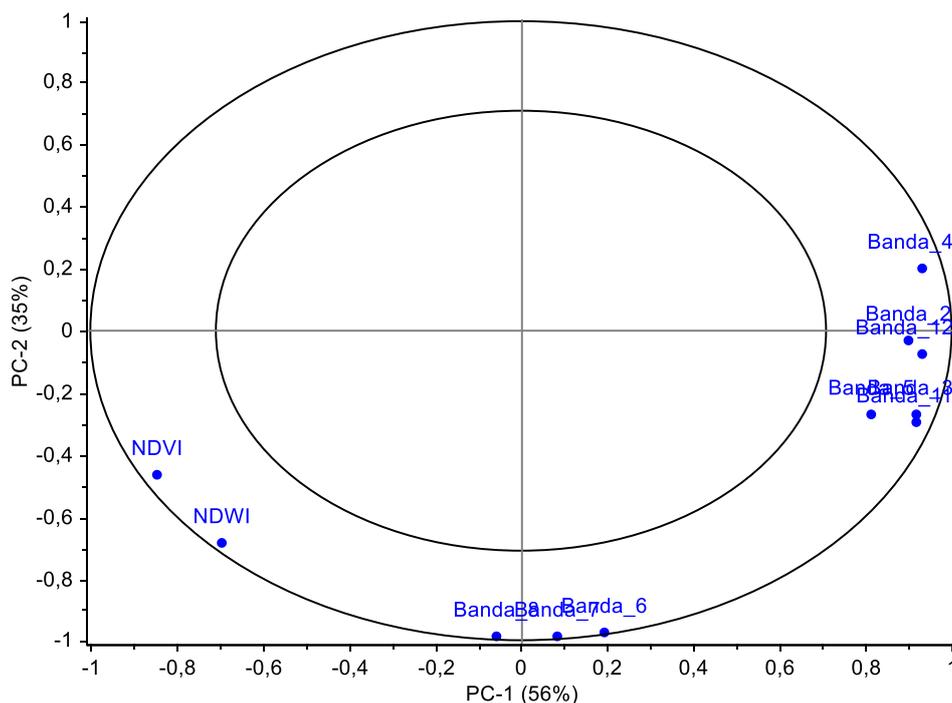


Figura 27 - Projeção integral do conjunto de dados considerando as duas componentes principais (PC-1 e PC-2). As variáveis que se encontram no espaço entre as duas elipses contribuem entre 50 a 100% para a variabilidade do modelo (Unscrambler X, versão 10.5.1).

4.3. Obtenção dos modelos para a determinação dos níveis de nutrientes na cultura

A qualidade do modelo de estimação do N na cultura pode ser observada na figura 28. Nesta figura observa-se a correlação entre o valor da percentagem de N determinado pelo método de referência e o valor da percentagem de N determinado pelo modelo MLR, onde se consideraram 11 variáveis, as 9 bandas (bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11 e 12) e os índices NDVI e NDWI.

Para a obtenção do modelo foram removidos os *outliers* identificados *a posteriori*, ou seja, aqueles identificados como *outliers* em x ou y no conjunto de amostras analisadas (3 amostras). A heterogeneidade do material vegetal em estudo, que resulta quer da variabilidade temporal, quer da variabilidade espacial afeta a qualidade dos modelos, como também foi descrito por Christy (2008), relativamente à heterogeneidade do solo. Desta forma, era esperado que houvesse a presença de *outliers*, e que foram removidos, tal como referido. De facto, a obtenção de um modelo de predição robusto leva alguns anos, na medida em que necessita de incluir o máximo de variabilidade no modelo, pelo que é vantajoso um modelo deste tipo incluir informação de vários anos.

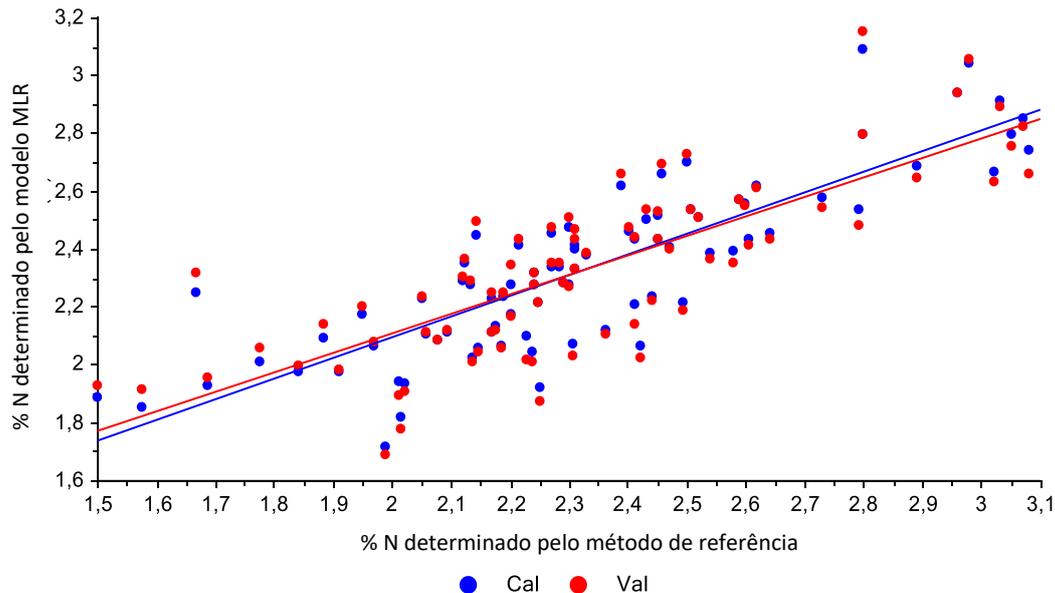


Figura 28 - Correlação dos valores de azoto nas folhas preditos pelo modelo e determinados pelo método de referência (Unscrambler X, versão 10.5.1).

Os parâmetros obtidos para o modelo de predição e validação encontram-se apresentados no quadro 12. Os valores de R^2 tanto para o modelo de predição, como para o modelo de validação, foram satisfatórios, respetivamente, 0,72 e 0,62. A validação deste modelo apresenta um RPD igual a 2,05, o que segundo Conzen (2014) o mesmo seria insuficiente para ser utilizado numa triagem grosseira, porém autores como Chang *et al.* (2001) e Dunn *et al.* (2002) consideram que valores de RPD superiores a 2 mostram que os modelos gerados são considerados excelentes. Relativamente ao parâmetro RMSE, este apresenta valores ainda assim considerados baixos para ambos os modelos, predição e validação, 0,196 e 0,212, respetivamente. O modelo obtido pode considerar-se viável e com alguma capacidade para determinar o N da cultura, ao contrário do afirmado por Weichelt *et al.* (n.d.), que consideraram não ser possível medir o N diretamente por meio de DR, sendo necessário um indicador indireto. Com efeito estes autores utilizaram apenas uma única banda (vermelho limite (*Red Edge*)), tendo sido utilizado neste trabalho as 9 bandas e os 2 índices, o que leva à obtenção de modelo com mais variáveis, logo mais explicativos.

Pela observação do anexo VI verifica-se pelo valor baixo de p do quadro da ANOVA que o modelo explica bem as variações da variável resposta, ou seja, do conteúdo em N, sendo as variáveis mais significativas para o modelo a banda 2, a banda 3, a banda 4, a banda 5, a banda 8 e os índices NDVI e NDWI.

Quadro 12 - Parâmetros estatísticos dos modelos de predição e validação obtidos através do programa Unscrambler X versão 10.5.1 para a determinação do azoto na matéria seca das folhas.

Modelos obtidos (Processamento dos espectros)	R ²	RPD	RMSE
Modelo de predição (normalização dos dados)	0,72	-	0,196
Modelo de validação cruzada (normalização dos dados)	0,62	2,05	0,212

Na figura 29 pode ser observar a qualidade do modelo de estimação do Ca na cultura. Nesta figura observa-se a correlação entre o valor da percentagem de Ca determinado pelo método de referência e o valor da percentagem de Ca determinado pelo modelo MLR, onde se consideraram 11 variáveis, as 9 bandas (bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11 e 12) e os índices NDVI e NDWI.

Para a obtenção do modelo foram removidos *outliers* identificados *a posteriori*, ou seja, aqueles identificados como *outliers* em x ou y no conjunto de amostras analisadas (4 amostras). Neste caso, para a determinação do Ca também se verificou a heterogeneidade do material vegetal, tal como aconteceu para a determinação do N sendo, deste modo, expectável que houvesse a presença de *outliers*, e que foram removidos, tal como referido.

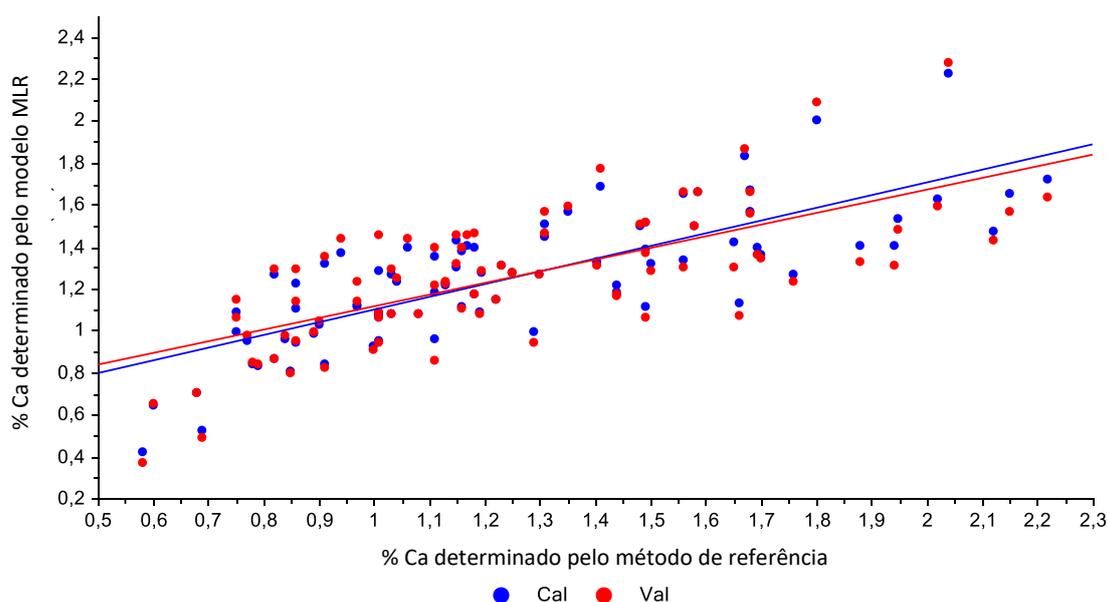


Figura 29 - Correlação dos valores de cálcio nas folhas preditos pelo modelo e determinados pelo método de referência (Unscrambler X, versão 10.5.1).

No quadro 13 estão apresentados os parâmetros obtidos para o modelo de predição e validação. O valor de R^2 para o modelo de predição apresenta-se satisfatório (0,61), enquanto o valor de R^2 do modelo de validação considera-se baixo (0,47). No que diz respeito ao RPD, este apresenta um valor de 1,37, o que de acordo com *Viscarra-rossel et al.* (2006) valores de RPD entre 1,0 e 1,4 indicam que o modelo pode ser usado para predição, mas apenas valores muito diferentes podem ser diferenciados. Relativamente ao parâmetro RMSE, este apresenta valores ainda assim considerados baixos para ambos os modelos, predição e validação, 0,265 e 0,285, respetivamente. Deste modo, apesar do modelo obtido para o N ser melhor do que o modelo obtido para o Ca, este ainda assim pode-se considerar viável para ser utilizado numa primeira abordagem, dado o facto que permite ainda com algum rigor a obtenção de resultados com uma certa rapidez.

Pela observação do anexo VII verifica-se pelo valor baixo de p do quadro da ANOVA que o modelo explica bem as variações da variável resposta, ou seja, do conteúdo em Ca, sendo as variáveis mais significativas para o modelo a banda 5, a banda 6, a banda 7, a banda 8 e o índice NDWI.

Quadro 13 - Parâmetros estatísticos dos modelos de predição e validação obtidos através do programa Unscrambler X versão 10.5.1 para a determinação do cálcio na matéria seca das folhas.

Modelos obtidos (Processamento dos espectros)	R^2	RPD	RMSE
Modelo de predição (normalização dos dados)	0,61	-	0,265
Modelo de validação cruzada (normalização dos dados)	0,47	1,37	0,285

A qualidade do modelo de estimação do K na cultura pode ser observada na figura 30. Nesta figura observa-se a correlação entre o valor da percentagem de K determinado pelo método de referência e o valor da percentagem de K determinado pelo modelo MLR, onde se consideraram 11 variáveis, as 9 bandas (bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11 e 12) e os índices NDVI e NDWI.

Para a obtenção do modelo foram removidos *outliers* identificados *a posteriori*, ou seja, aqueles identificados como *outliers* em x ou y no conjunto de amostras analisadas (6 amostras). Neste caso para a determinação do K também se verificou a heterogeneidade do

material vegetal, tal como aconteceu para a determinação tanto do N como do Ca sendo, deste modo, também expectável que houvesse a presença de *outliers*, e que foram removidos, tal como referido.

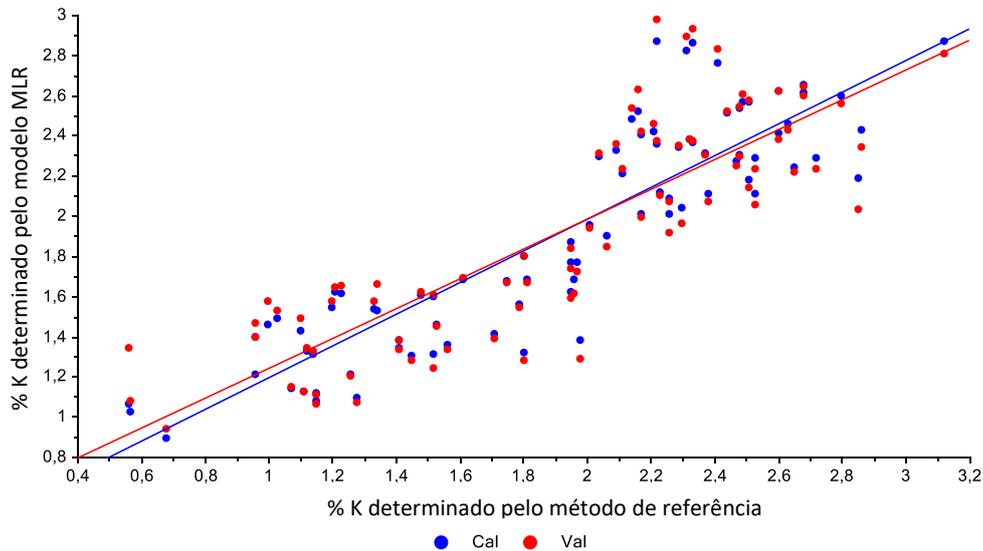


Figura 30 - Correlação dos valores de potássio nas folhas preditos pelo modelo e determinados pelo método de referência (Unscrambler X, versão 10.5.1).

Os parâmetros obtidos para o modelo de predição e validação encontram-se apresentados no quadro 14. Ambos os modelos, predição e validação, apresentam R^2 aceitáveis, 0,79 e 0,70, respetivamente (Sayes *et al.*, 2005). A validação deste modelo apresenta um RPD igual a 1,88, o que segundo Viscarra-rossel *et al.* (2006) este modelo pode ser usado para predição e que são possíveis análises quantitativas. No que diz respeito ao parâmetro RMSE, este ainda que apresente valores para os dois modelos (predição e validação) mais elevados que nos modelos apresentados anteriormente, são considerados baixos, com valores igual a 0,298 e 0,329, respetivamente. Deste modo, o modelo para o K não é tão bom como o modelo para o N, mas é consideravelmente melhor que o modelo para o Ca. Assim, de acordo com os parâmetros apresentados pode-se considerar este modelo viável para a determinação do K através dos dados obtidos via satélite.

Pela observação do anexo VIII verifica-se pelo valor baixo de p do quadro da ANOVA que o modelo explica bem as variações da variável resposta, ou seja, do conteúdo em K, sendo as variáveis mais significativas para o modelo a banda 4, a banda 5, a banda 6, a banda 7, banda 12 e o índice NDVI.

Quadro 14 - Parâmetros estatísticos dos modelos de predição e validação obtidos através do programa Unscrambler X versão 10.5.1 para a determinação do potássio na matéria seca das folhas.

Modelos obtidos (Processamento dos espectros)	R²	RPD	RMSE
Modelo de predição (normalização dos dados)	0,79	-	0,298
Modelo de validação cruzada (normalização dos dados)	0,70	1,88	0,329

4.4. Aplicação dos modelos obtidos para a obtenção dos mapas de distribuição espacial dos nutrientes

Para a aplicação dos modelos obtidos optou-se pela seguinte abordagem:

A partir da imagem de satélite do dia 13 julho de 2021 foi realizado um processamento no programa *ArcGIS Desktop* versão 10.6, tendo-se efetuado primeiramente a sua reprojeção do sistema de projeção GCS_WGS_1984 para o sistema de coordenadas Hayford-Gauss – Militar (ETRS_1989_Portugal_TM06). De seguida, para as bandas de resolução espacial de 20 m (b5, b6, b7, b11 e b12), procedeu-se à sua reamostragem para 10 m utilizando o algoritmo do vizinho mais próximo. Posteriormente foram aplicados os modelos obtidos para o N, Ca e K, onde se teve em consideração os valores das 9 bandas (bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11 e 12) e dos índices NDVI e NDWI, do qual resultaram os respetivos mapas de distribuição para os nutrientes em estudo (Figura 31, 32 e 33). É de referir que os valores obtidos nos mapas de distribuição espacial do teor de nutrientes foram agrupados em classes, tendo como base a informação que consta nos boletins de análise foliar para a cultura em estudo.

Através dos mapas de distribuição espacial dos nutrientes apresentados (Figura 31, 32 e 33) é possível interpretar o estado nutricional da cultura para os nutrientes em estudo. Comparando os valores obtidos com os valores de referência que constam nos boletins de análise foliar, verifica-se que dos macronutrientes em estudo, apenas o teor de N se apresenta insuficiente na maior parte da área do pomar. Relativamente ao teor de Ca e K, os valores estimados no pomar, estão situados dentro dos intervalos que correspondem a situações em que a nutrição é equilibrada e não é limitante para o bom funcionamento da cultura, sendo os adequados para o correto equilíbrio entre a qualidade e a produção.

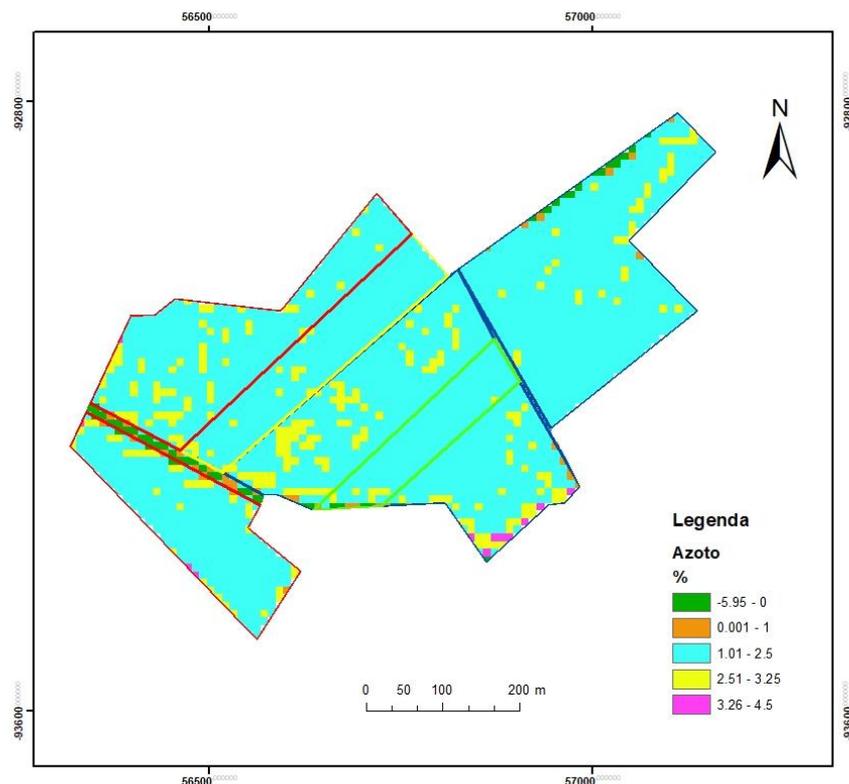


Figura 31 - Mapa de distribuição espacial do azoto de dia 13 de julho de 2021 com base no modelo obtido para o azoto (ArcGIS Desktop, versão 10.6).

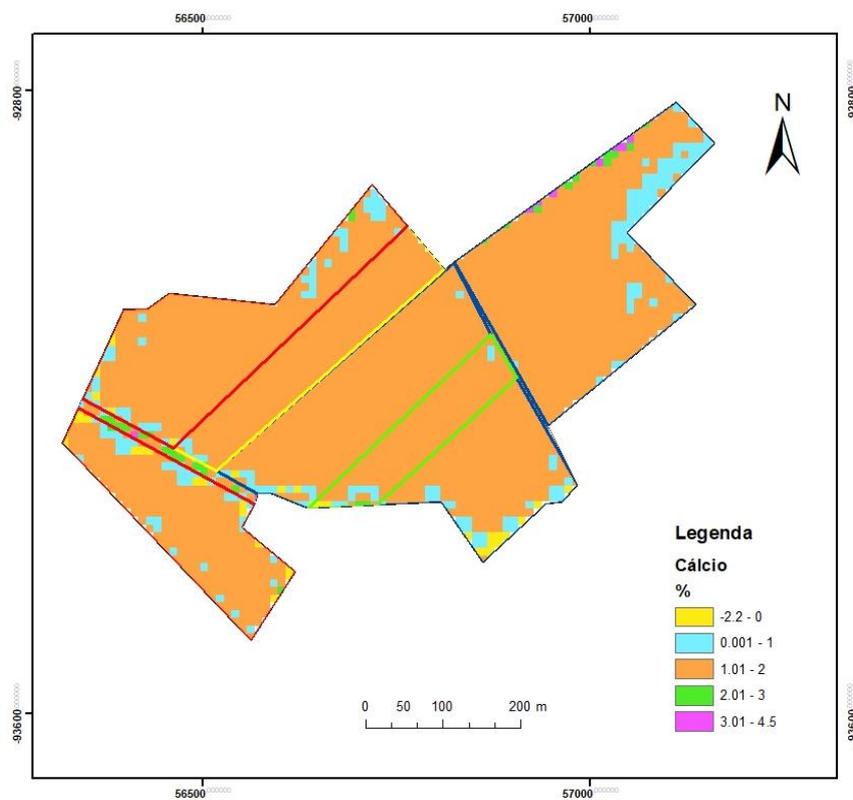


Figura 32 - Mapa de distribuição espacial do cálcio de dia 13 de julho de 2021 com base no modelo obtido para o cálcio (ArcGIS Desktop, versão 10.6).

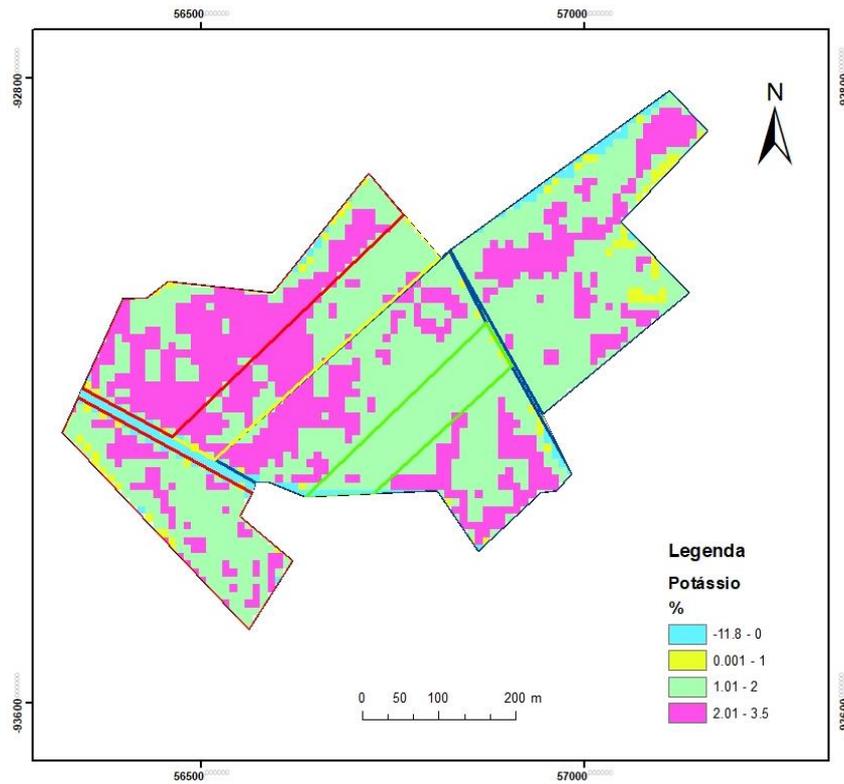


Figura 33 - Mapa de distribuição espacial do potássio de dia 13 de julho de 2021 com base no modelo obtido para o potássio (ArcGIS Desktop, versão 10.6).

5. Conclusões

A espectroscopia de infravermelho próximo com Transformada de *Fourier* mostrou-se uma técnica capaz de quantificar o conteúdo de nutrientes em material vegetal, minimamente processado, particularmente, para o azoto, cálcio e potássio. Deste modo, é uma técnica eficaz em trabalhos deste âmbito, dado o facto que permite em pouco tempo, com pouca preparação da amostra, com baixo custo e com muito reduzida produção de resíduos para o meio ambiente, quantificar os parâmetros em estudo. Apesar de haver vantagem em incluir variabilidade inter anual em modelos de previsão, podendo obter melhores modelos, neste caso, a variabilidade presente nas amostras mostrou-se adequada para a obtenção de modelos de previsão robustos.

Com base na informação do satélite de observação da Terra (Sentinel-2), a análise de componentes principais demonstrou que todas as variáveis (banda 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, NDVI e NDWI), contribuem mais de 50% para a variabilidade do modelo, o que significa que todas apresentaram boa capacidade discriminatória.

A regressão linear múltipla foi o algoritmo utilizado para a obtenção dos modelos com base na informação espectral do satélite Sentinel-2, os quais apresentaram boas correlações para a quantificação dos níveis de azoto, cálcio e potássio. Apesar dos resultados promissores, é de salientar que é necessário incluir a variabilidade inter anual, de modo a obter modelos mais robustos.

A utilização dos dados obtidos através de deteção remota (Sentinel-2) possibilitou a construção de modelos relativamente robustos que podem ser utilizados não só para o diagnóstico do estado nutricional, mas também permitindo criar soluções de gestão da fertilização das culturas.

A monitorização do estado nutricional numa cultura é de extrema importância para tornar a produção agrícola mais sustentável e económica no futuro. Dos nutrientes em estudo, é de realçar que aplicações excessivas de azoto, associadas à sua elevada mobilidade, levam a fenómenos de lixiviação, o que se pode repercutir em prejuízos económicos, implicações na saúde humana e no meio ambiente, pelo que a sua utilização deve ser racionalizada. O cálcio e o potássio ainda que com menor impacte ambiental, são nutrientes importantes para a qualidade dos frutos, o que torna a monitorização destes elementos nas culturas um aspeto importante. A aplicação de modelos deste tipo permite uma gestão da nutrição das culturas mais sustentável e económica no futuro.

Com o objetivo de aplicar os modelos obtidos foram efetuados os mapas de distribuição espacial dos nutrientes em estudos. Com isto obteve-se a informação do estado nutricional da cultura, no entanto, esta informação será mais importante no próximo ano, quando os modelos forem aplicados diretamente no pomar.

No seguimento deste trabalho e com a variabilidade inter anual incluída nos modelos, seria interessante, no próximo ano, a partir dos modelos obtidos produzir mapas com a distribuição espacial dos nutrientes na cultura e validar estes resultados com a recolha de amostras de material vegetal e execução dos métodos de referência. Também seria interessante testar outros índices de vegetação, tais como os que utilizam as bandas do vermelho limite (*Red Edge*), bandas estas que têm maior sensibilidade para variações na vegetação.

6. Referências bibliográficas

- Alexandris, N., Gupta, S., & Koutsias, N. (2017). Remote sensing of burned areas via PCA, Part 1; centering, scaling and EVD vs SVD. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2(17), 11.
- Almeida, C. (2017). Importância económica da noqueira para a produção de noz. *Agroforum*, 7.
- Almeida, C. M. (2017). *Nogueira: Estado da Produção* (EDITOR CNCFS (ed.)), 59.
- Almeida, C. M. (2020). A produção e comercialização de noz em Portugal e no contexto mundial. *SCAP*, 7.
- Almeida, F. N. M. (2009). *Espectroscopia de Infravermelho Próximo com Transformada de Fourier (FT-NIR) na Caracterização de Farinhas para Alimentação Pueril* (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Araujo, A. M. (2007). *Monitoramento de processos em tempo real via espectrofotometria no infravermelho próximo* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Tiradentes - UNIT, Aracaju.
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). The Essentiality of Certain Elements in Minute Quantity for Plants with Special Reference to Copper. *Plant Physiology*, 14, 5.
- Associação dos Jovens Agricultores de Portugal. (2017). *Manual boas práticas para culturas emergentes: a cultura da noz*, 44.
- Barkley, Y. C. (2007). Carpathian walnul. *Alternative Tree Crops Information*, 5, 2.
- Barros, J. F. C. (2020). *Fertilidade do solo e Nutrição das plantas*, 33.
- Barufaldi, M. (2018). *Noz ou nozes; repleta de ácido alfa-linolênico que protege sua saúde*. LinkedIn.
- Bayazit, S., Kazan, K., Gülbitti, S., Çevik, V., Ayanoglu, H., & Ergül, A. (2007). AFLP analysis of genetic diversity in low chill requiring walnut (*Juglans regia* L.) genotypes from Hatay, Turkey. *Scientia Horticulturae*, 111(4), 394–398.
- Bernard, A., Lheureux, F., & Dirlewanger, E. (2017). Walnut: past and future of genetic improvement. *Tree Genetics & Genomes*, 28.

- Blanco, M., Coello, A., Iturriaga, H., MasPOCH, S., & Pagès, J. (1998). Calibration in non-linear near infrared spectroscopy: comparison of several methods. *Analytical Chimica Acta*, 8.
- Brandão, Z. N. (2009). *Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto* (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Canada Centre for Remote Sensing. (n.d.). *Fundamentals of Remote Sensing*, 258. https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutorial/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- Cardoso, J. V. C. (1965). *OS SOLOS DE PORTUGAL, Sua Classificação, Caracterização e Gênese* (Secretaria de Estado da Agricultura - Direção-Geral dos Serviços Agrícolas (Ed.)), 311.
- Ceítíl, L. O. (2007). *Process Analytical Technology in Active Pharmaceutical Ingredients Production* (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Chang, C., Laird, D. A., Mausbach, M. J., & Hurbug Junior, C. R. (2001). Near infrared reflectance spectroscopy – principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of American Journal*, 25, 480–490.
- Chemura, A., Mutanga, O., Odindi, J., & Kutuywayo, D. (2018). Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 11.
- Christy, C. D. (2008). Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61, 10–19.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (S. A. EDICIONES RIALP (Ed.); 2nd ed.), 224.
- Conzen, J. P. (2014). *Multivariate Calibration. A Practical Guide for the Method development in the Analytical Chemistry* (B. O. GmbH (Ed.); 3rd ed.), 127.
- Cui, M., Zeng, L., Qin, W., & Feng, J. (2020). Measures for reducing nitrate leaching in orchards: A review. *Environmental Pollution*, 15.

- DronEng. (2018). *Radiação Eletromagnética x Planta*.
<https://blog.droneng.com.br/radiacao-eletromagnetica-e-plantas/>
- Dunn, B., Beecher, H. G., Batten, G. D., & Ciavarella, S. (2002). The potential of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis — a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42, 607–614.
- Dutra, M. S. (2018). *Aplicação da espectroscopia do infravermelho próximo para a previsão da composição mineral da extrusa de pasto nativo em pequenos ruminantes* (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA, Sobral.
- Earth Observing System. (2015). *SENTINEL-2*. <https://eos.com/find-satellite/sentinel-2/>
- European Space Agency. (2009). *Atmospheric interference*.
https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMUY3Z2OF_0.html
- European Space Agency. (2015a). *Applications*. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/applications>
- European Space Agency. (2015b). *Sentinel-2*.
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
- European Space Agency. (2021). *Copernicus Open Access Hub*.
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Feio, S. V. M. (2017). *Análise multitemporal de imagens do satélite Sentinel-2 como suporte à elegibilidade das ajudas comunitárias agrícolas* (Trabalho de Projeto de Mestrado). Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências, Lisboa.
- Feitosa, J. R. P., Costa Filho, J. F., & Silva, B. B. (2004). *Avaliação de índices de vegetação em área irrigada do sub-médio São Francisco, Petrolina-PE, a partir de imagens do satélite LANDSAT 5-TM*, 18.
- Ferreira, M. P. (2019). *Contribuição da detecção remota para o estudo da biomassa de pinhais na Herdade da Apostiça (Sesimbra)* (Dissertação de Mestrado). Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- Ferreira, T. R. M. (2018). *Construção de um modelo utilizando a Análise Discriminante para a detecção de Acidemia Fetal* (Dissertação de Mestrado). Universidade do Porto,

Porto.

- Fjellstrom, R. G., & Parfitt, D. E. (1994). Walnut (*Juglans* spp.) genetic diversity determined by restriction fragment length polymorphisms. *Genoma*, 37(4), 690–700.
- Fonseca, A. D., & Fernandes, J. C. (2004). *Detecção Remota* (Lidel (Ed.)), 224.
- Gao, B.-C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
- Germain, E. (1999). *Le Noyer* (Ctifl (Ed.)), 279.
- Grimm, A. M. (2006). *Meteorologia Básica - Notas de Aula*. Departamento de Física - Universidade Federal Do Paraná.
- Hänsch, R., & Mendel, R. R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, 12, 8.
- Huete, A. R., & Liu, H. (1994). An error and sensitivity analysis of the atmospheric- and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 9.
- Iannamico, L. (2009). *EL Cultivo del Nogal* (INTA (Ed.)), 120.
- Iannamico, L. (2015). *Cultivo del Nogal*, 7.
- Instituto Nacional de Estatística. (2018). *Estatísticas Agrícolas 2018*, 171.
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2021). <https://www.ipma.pt/pt/index.html>
- Klemas, V. V. (2009). *Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management - Sensors and Techniques for Observing Coastal Ecosystems* (Xiaojun Yang (Ed.)). Springer, Berlin, Heidelberg, 560.
- Kulawardhana, R. W., Thenkabail, P. S., Vithanage, J., Biradar, C., Islam, M. A., Gunasinghe, S., & Alankara, R. (2007). Evaluation of the wetland mapping methods using Landsat ETM+ and SRTM data. *Journal of Spatial Hydrology*, 34.
- Lenda, M., Knops, J. H., Skórka, P., Morón, D., & Woyciechowski, M. (2017). Cascading effects of changes in land use on the invasion of the walnut *Juglans regia* in forest ecosystems. *Journal of Ecology*, 106(2), 671–686.
- Lequeue, G., Draye, X., & Baeten, V. (2016). Determination by near infrared microscopy

- of the nitrogen and carbon content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) leaf powder. *Scientific Reports*, 9.
- Lily, M. N., & Simmons, R. (1999). Infrared Spectroscopy. *Analytical Chimica Acta*, 8.
- López, R. R., Palafox, A. R. N., Medina, S. M., Ballesteros, F. G. D., & Rivera, M. M. (2014). Análisis de rentabilidad del cultivo de nogal pecanero en la costa de hermosillo. *Revista Mexicana Agronegocios*, 11.
- Lorente, F. L. (1990). *El Nogal* (MUNDIPRENSA (Ed.)), 155.
- Maathuis, F. J. (2009). Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology*, 9.
- Machado, I. S. J. (2018). *Análise do potencial de dados Sentinel-2 na classificação da ocupação do solo no controlo de subsídios agrícolas* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Lisboa - Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- Martins, C. R., Fronza, D., Malgarim, M. B., Bilharva, M. G., Marco, R., & Hamann, J. J. (2017). Cultura da noz-pecã para a agricultura familiar. *Alternativas Para a Diversificação Da Agricultura Familiar de Base Ecológica*, 17.
- Martins, F. D. (2012). *Utilização de técnicas de Detecção Remota na identificação de Acacia sp. na Região Centro Sul de Portugal Continental* (Dissertação de Mestrado). Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco.
- Maso, B. K. D., Castilho, E. V., Hammer, M. M., & Hiraoka, R. A. (2019). *Sensoriamento remoto aplicado à agricultura*. 23.
- Mather, P. M. (2005). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction* (WILEY (Ed.); 3rd ed.), 442.
- McLaughlin, S. B., & Wimmer, R. (1999). Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. *New Phytologist*, 142, 44.
- Mee, C. Y., Balasundram, S. K., & Hanif, A. H. M. (2017). Detecting and Monitoring Plant Nutrient Stress Using Remote Sensing Approaches: A Review. *Science Alert*, 16(1), 8.
- Mendes, J. C. (1983). *Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica*.
- Metrohm. (2006). *NIR Spectroscopy - A guide to near-infrared spectroscopic analysis of*

industrial manufacturing processes, 46.

Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas. (2007). *NOZ*, 12.

Miura, T., Huete, A. R., Yoshioka, H., & Holben, B. N. (2001). An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, N°78, 14.

Monteiro, M. G. B. (2020). *A contribuição da detecção remota para avaliar o sequestro de carbono em ecossistemas florestais: uma revisão* (Dissertação de Mestrado). Universidade do Porto - Faculdade de Ciências, Porto.

Moreira, M. A. (2005). *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação* (UFV (Ed.); 3rd ed.), 246.

Moreira, R. C. (2000). *Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 179.

Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., & Davies, T. (2002). *A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification* (NIR Publication (Ed.)), 338.

National Aeronautics and Space Administration. (2000). *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*.

https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php

Palomares, J. I. S. (2008). *Frutos secos en Cantabria: La nuez y la avellana* (Investigación y experimentación (Ed.)). CIFA, 121.

Paż-Dyderska, S., Jagodziński, A. M., & Dyderski, M. K. (2021). Possible changes in spatial distribution of walnut (*Juglans regia* L.) in Europe under warming climat. *Regional Environmental Change*, 13.

Pereira, G. J. (1990). *Nut Production and Industry in Europe, Near East and North Africa: Proceedings of the "Expert Consultation on the Promotion of Nut Production in Europe and Near East Regions."* FAO, 412.

Pereira, J. M. C. (2017). *Detecção Remota e Análise de Imagens*, 137.

Petisco, C., García, B., Aldana, B. R. V., & Mediavilla, S. (2005). Use of near-infrared

- reflectance spectroscopy in predicting nitrogen, phosphorus and calcium contents in heterogeneous woody plant species. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 9.
- Ponzoni, F. J. (2001). *Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais - Comportamento Espectral da Vegetação* (Embrapa (Ed.)). Universidade de Brasília, Brasília.
- Pou, M. M. (2001). *El Nogal*. Ediciones Mundi Prensa, 350.
- Quin, N. W. (2019). *Electromagnetic Radiation (EMR) and its application in Remote Sensing*, 15.
https://en.unesco.org/sites/default/files/ukzn_fundamentals_of_remote_sensing_sat_12_for_upload.pdf
- Regato, M., Silva, O., Sousa, R., & Guerreiro, I. (2016). Fertilização do Pomar de Nogueiras. *Agrociência*, 12.
- Reich, G. (2005). Near-infrared spectroscopy and imaging: Basic principles and pharmaceutical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, Nº 57, 35.
- Rencher, A. C. (2002). *Methods of Multivariate Analysis* (WILEY-INTERSCIENCE (Ed.); 2nd ed.), 727.
- Ricardo, A. C. C. (2018). *Análise multitemporal de imagens de satélite para cartografia de produtos hortícolas* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Lisboa: Faculdade de Ciências, Lisboa.
- Rigo, D., Enescu, C. M., Durrant, T. H., & Tinner, W. (2016). *Juglans regia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In *European Atlas of Forest Tree Species*, 1.
- Riley, M. R., Canaves, L. C. (2002). FT-NIR Spectroscopic Analysis of Nitrogen in Cotton Leaves. *Applied Spectroscopy*, 8.
- Robledo, J. D. (1981). *Atlas de las frutas y hortalizas* (Ministerio de Agricultura (Ed.)), 433.
- Saavedra, N. J. C. (2020). *Avaliação do potencial das imagens dos Satélites Sentinel 2 na monitorização do cumprimento de alguns dos requisitos da PAC* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Évora, Évora.
- Santos, J. Q. (1996). *Fertilização: Fundamentos da utilização dos adubos e corretivos*

(Publindústria (Ed.)), 556.

Santos, M. (2007). *Desenvolvimento e Validação de Métodos de Espectroscopia no Infravermelho Próximo e Médio para Caracterização de Lamas de ETAR para uso agrícola* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Lisboa, Lisboa.

Santos, R. E. (2012). Utilização da Análise de Componentes Principais na compressão de imagens digitais. *Einstein*, 5.

Sayes, W., Mouazen, A. M., & Ramon, H. (2005). Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 91, 393–402.

Science Education through Earth Observation for High Schools. (2008). *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c02-p02.pt.html>

Siesler, H. W., Ozaki, Y., Kawata, S., & Heise, H., M. (2002). Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications. *Journal of Chemometrics*, 3.

Sousa, A. M. O., & Silva, J. R. M. (2017). *Conceitos teóricos de Detecção Remota*, 57.

Sousa, F. A., Souza, M. J. H., Ribeiro, A., & Leite, F. P. (2009). *Disponibilidade do número de horas de frio em cocais, minas gerais*, 5.

Souza, J. S., Ferrão, M. F. (2006). Aplicações da espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de medicamentos contendo diclofenaco de potássio. Parte I: Dosagem por regressão multivariada. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 9.

Steffen, C. A. (1999). *Introdução ao Sensoriamento Remoto*.

Thor, K. (2019). Calcium - Nutrient and Messenger. *Frontiers in Plant Science*, 10, 7.

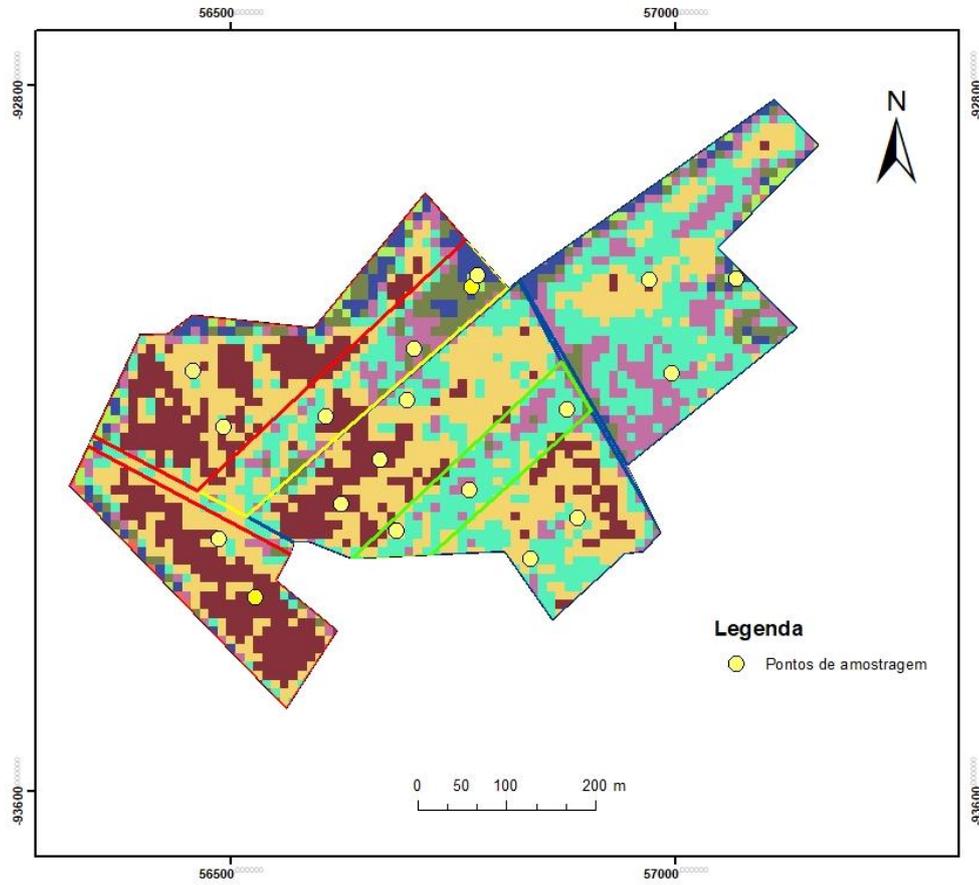
Tripathi, D., Singh, V. P., Chauhan, D. K., & Prasad, S. M. (2014). Role of Macronutrients in Plant Growth and Acclimation: Recent Advances and Future Prospective. In *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes*, 19.

Tufik, C. B. A. (2017). *A nutrição do mornagueiro (Fragaria x ananassa Duch.): Efeito na fisiologia e qualidade dos frutos* (Tese de Douturamento). Universidade de Évora, Évora.

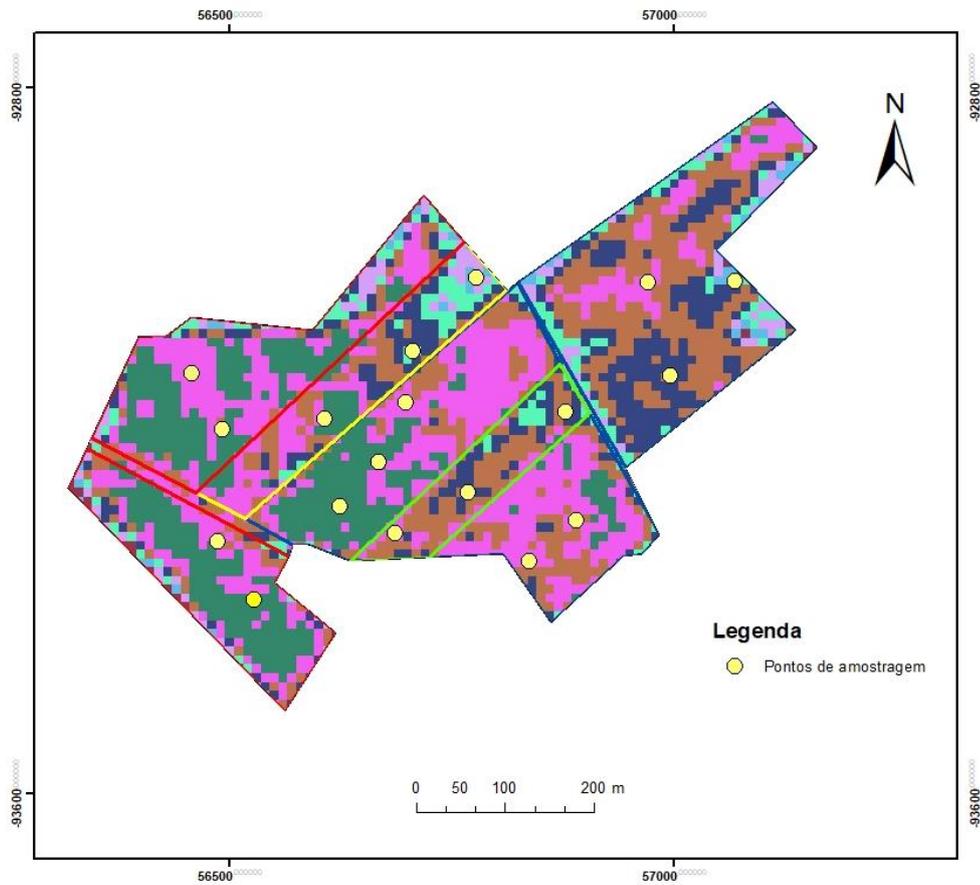
- Verde, F. G. (2020). *A importância do solo para o futuro da agricultura*. Syngenta. <https://blog.syngenta.pt/a-importancia-do-solo-para-o-futuro-da-agricultura/>
- Vilar, P. M. C. (2015). *Utilização de Imagens de Detecção Remota para Monitorização das Culturas e Estimação das Necessidades de Rega* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências, Lisboa.
- Viscarra-rossel, R. A., Mcglynn, R. N., & Mcbratney, A. B. (2006). Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-VISNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137, 70–82.
- Wallheimer, B. (2011). *Walnut trees may not be able to withstand climate change*. Purdue University. <https://www.purdue.edu/newsroom/research/2011/111128JacobsWalnut.html>
- Weichelt, H., Rosso, P., Marx, A., Reigber, S., Kim, D., & Heynen, M. (n.d.). The RapidEye Red Edge Band. *RapidEye*, 6.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in Plants. *Annals of Botany*, 92, 25.
- Willey, C. R. (1970). Effects of short periods of anaerobic and aerobic conditions on uptake by tobacco roots. *Agronomy Journal*, 62, 224–229.
- Yousfi, S., Peira, J. F. M., Horra, G. R., & Ablanque, P. V. M. (2019). Remote Sensing: Useful Approach for Crop Nitrogen Management and Sustainable Agriculture. In IntechOpen (Ed.), *Sustainable Crop Production*, 12.
- Zareef, M., Chen, Q., Hassan, M. M., Arslan, M., Hashim, M. M., Ahmad, W., Kutsanedzie, F. Y. H., & Agyekum, A. A. (2020). An Overview on the Applications of Typical Non-linear Algorithms Coupled With NIR Spectroscopy in Food Analysis. *Food Engineering Reviews*, 18.

7. Anexos

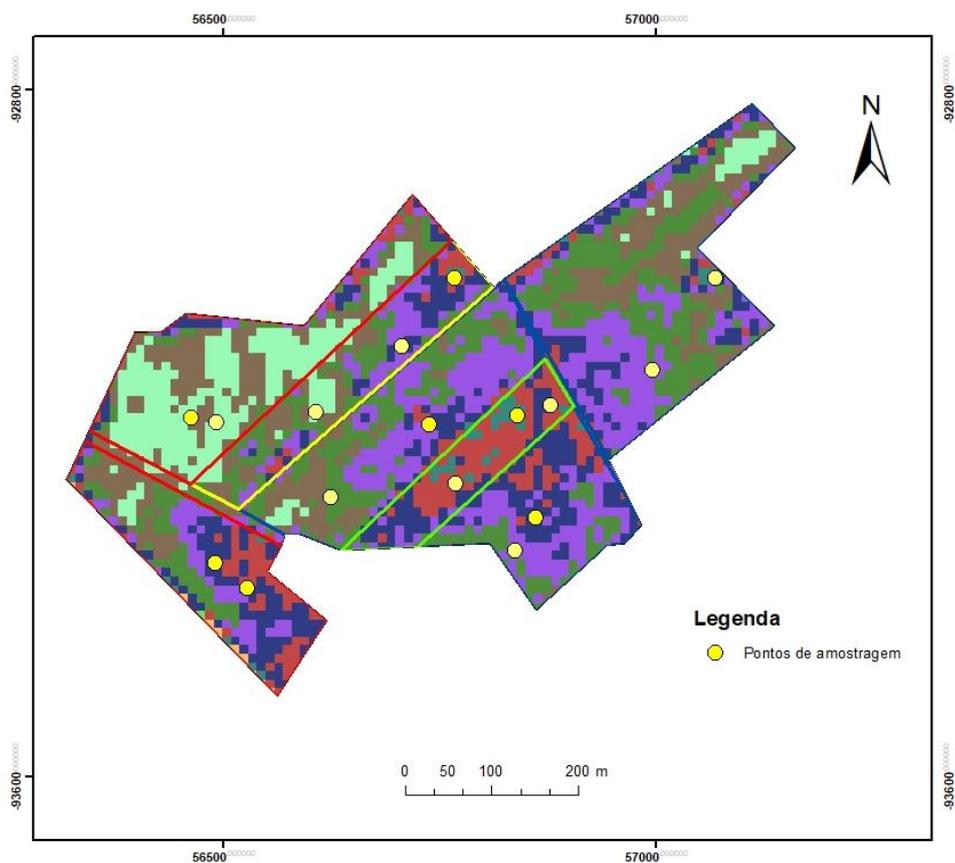
Anexo I - Pontos de amostragem da data de 3 de junho de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).



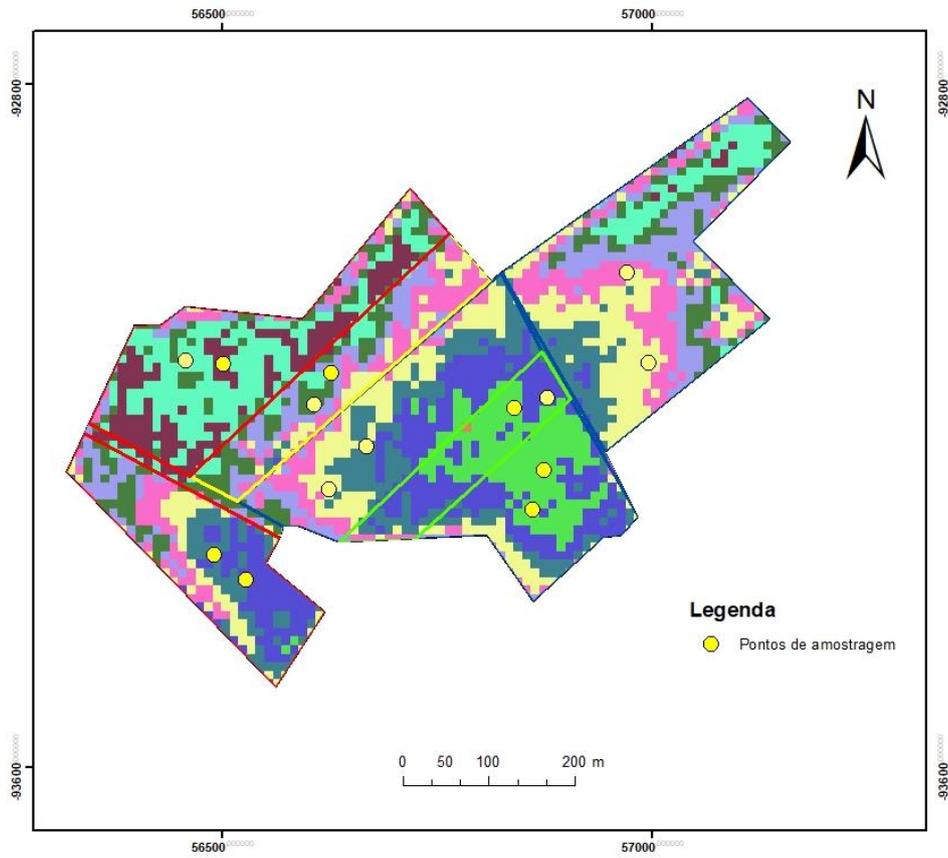
Anexo II - Pontos de amostragem da data de 23 de junho de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).



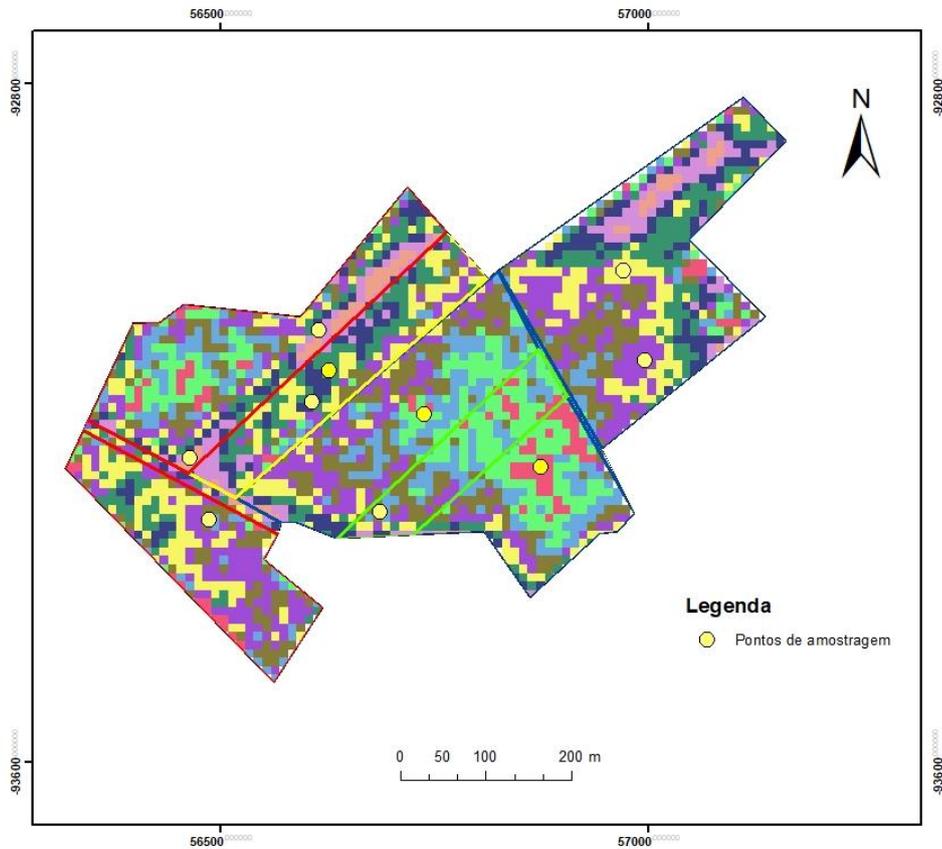
Anexo III - Pontos de amostragem da data de 23 de julho de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).



Anexo IV - Pontos de amostragem da data de 12 de agosto de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).



Anexo V - Pontos de amostragem da data de 21 de setembro de 2021 da imagem da reclassificação da banda 8 em 10 classes (ArcGIS Desktop, versão 10.6).



N							
Anova Table							
Multiple Correlation: 0,8457573 (cal) 0,7890506 (val)							
R-Square: 0,7153054 (cal) 0,6183376 (val)							
Summary	SS	df	MS	F ratio	p value	B-coefficients	STDerr
Model	6.964601	11	0.633146	16.44572	1.42E-15		
Error	2.771935	72	0.038499				
Adjusted Total	9.736536	83	0.117308				
Variables							
Intercept	0.37323	1	0.37323	9.694565	0.002652	16.88239	5.42213
Banda_2	0.351526	1	0.351526	9.130733	0.003479	0.21422	0.070893
Banda_3	2.155899	1	2.155899	55.99865	1.41E-10	-0.66614	0.089018
Banda_4	0.160736	1	0.160736	4.175069	0.044683	-0.96822	0.473849
Banda_5	0.278264	1	0.278264	7.227806	0.008912	0.293069	0.10901
Banda_6	0.12475	1	0.12475	3.240334	0.076035	0.557785	0.309864
Banda_7	0.000605	1	0.000605	0.015707	0.900613	-0.03917	0.312565
Banda_8	0.158415	1	0.158415	4.114771	0.04621	-0.51621	0.254481
Banda_11	0.119079	1	0.119079	3.093044	0.082877	0.584965	0.332611
Banda_12	0.025411	1	0.025411	0.660047	0.419222	-0.14154	0.174223
NDVI	0.310482	1	0.310482	8.0647	0.005864	-1.43479	0.505236
NDWI	0.214992	1	0.214992	5.584335	0.020825	0.8031	0.339847

Ca							
Anova Table							
Multiple Correlation: 0,778477 (cal) 0,6951256 (val)							
R-Square: 0,6060264 (cal) 0,4721296 (val)							
Summary	SS	df	MS	F ratio	p value	B-coefficients	STDerr
Model	7.860518	11	0.714593	10.20832	5.53E-11		
Error	5.110071	73	0.070001				
Adjusted Total	12.97059	84	0.154412				
Variables							
Intercept	0.026314	1	0.026314	0.375915	0.541703	-4.6748	7.624622
Banda_2	0.223276	1	0.223276	3.189612	0.07826	0.167396	0.093729
Banda_3	0.000195	1	0.000195	0.002781	0.958087	0.006041	0.114545
Banda_4	0.080228	1	0.080228	1.146112	0.287891	0.725278	0.677471
Banda_5	1.575719	1	1.575719	22.50996	1.01E-05	-0.69283	0.146029
Banda_6	0.285649	1	0.285649	4.080641	0.047048	0.821154	0.4065
Banda_7	0.289272	1	0.289272	4.132402	0.045707	-0.8157	0.401261
Banda_8	0.369768	1	0.369768	5.282332	0.024409	0.872915	0.379804
Banda_11	0.072796	1	0.072796	1.039939	0.311203	-0.51351	0.503556
Banda_12	0.048895	1	0.048895	0.698489	0.406019	-0.17618	0.210804
NDVI	0.117498	1	0.117498	1.678535	0.199201	0.953571	0.736017
NDWI	0.504895	1	0.504895	7.2127	0.008956	-1.46997	0.547343

K							
Anova Table							
Multiple Correlation: 0,8884193 (cal) 0,840539 (val)							
R-Square: 0,7892889 (cal) 0,7046351 (val)							
Summary	SS	df	MS	F ratio	p value	B-coefficients	STDerr
Model	24.60917	11	2.237198	25.19926	1.01E-20		
Error	6.569742	74	0.08878				
Adjusted							
Total	31.17892	85	0.366811				
Variables							
Intercept	0.939488	1	0.939488	10.58219	0.001722	29.38634	9.033534
Banda_2	0.022777	1	0.022777	0.256551	0.614005	0.056214	0.110983
Banda_3	0.243634	1	0.243634	2.74423	0.101841	-0.21544	0.130049
Banda_4	0.670482	1	0.670482	7.552164	0.007525	-2.18823	0.796265
Banda_5	0.393568	1	0.393568	4.433052	0.038643	-0.34707	0.16484
Banda_6	1.708775	1	1.708775	19.24721	3.75E-05	2.067452	0.47125
Banda_7	0.849228	1	0.849228	9.565494	0.002796	-1.44953	0.468678
Banda_8	0.170354	1	0.170354	1.918821	0.170148	0.542578	0.391692
Banda_11	0.000524	1	0.000524	0.005901	0.938975	-0.03953	0.514578
Banda_12	0.352748	1	0.352748	3.973263	0.049915	0.468	0.234786
NDVI	0.737932	1	0.737932	8.31191	0.005153	-2.42915	0.842565
NDWI	0.020523	1	0.020523	0.231162	0.632082	0.259598	0.539937