

Desenvolvimento de uma base de dados para o zonamento agroclimático do Aproveitamento Hidroagrícola de Cela

Sebastian Thomas Magalhães Freyre-Sanders

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
**Engenharia Agronómica especialização em Hortifruticultura e
Viticultura**

Orientadores:

Professor Doutor João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes

Professora Doutora Paula Cristina Santana Paredes

Júri:

Presidente: Doutor Gonçalo Pereira Fernandes Caleia Rodrigues, Professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Vogais: Doutora Maria Teresa Gomes Afonso do Paço, Professora auxiliar com agregação do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Doutor João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes, Professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento aos meus orientadores, Professora Doutora Paula Cristina Santana Paredes e Professor Doutor João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes, pela oportunidade de integrar tecnologias associadas à aquisição de dados, tanto através de estações meteorológicas como da plataforma ERA5. Esta experiência foi extremamente enriquecedora, contribuindo para o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos noutras unidades curriculares, nomeadamente “Estatística e Delineamento Experimental”, bem como para a aplicação de novas fórmulas que me ajudaram a compreender melhor a importância da correlação de dados — não apenas pela sua viabilidade, mas também pelos erros e enviesamentos que pode acarretar. Este processo despertou em mim uma maior motivação para utilizar modelos estatísticos, os quais espero poder aplicar na minha vida profissional.

Para além do âmbito académico, não posso deixar de expressar o quanto sou grato pelas amizades que se foram consolidando ao longo do percurso. Agradeço especialmente à Daniela Soares, Antónia Ferreira, Gabriel, José António, Enri, Erik e Razieh. Merece ainda um destaque especial o Daniel Garcia, não só pela amizade, como também pelo papel relevante que desempenhou na minha dissertação, oferecendo sugestões valiosas ao longo do processo. Sempre se mostrou disponível para ajudar, mesmo sem que lhe fosse solicitado.

Agradeço também às entidades do Instituto Superior de Agronomia pela aceitação da minha candidatura ao Mestrado em Engenharia Agronómica. Aproveito para manifestar a minha satisfação com o apoio prestado pela Divisão Académica e pela Associação de Estudantes. Felicito ainda ao Agrolivro por vender livros que me darão um enorme auxílio, cuja coleção de obras tem sido de grande utilidade nos momentos em que precisei de reforçar ou rever conteúdos.

A nível pessoal, deixo um profundo agradecimento aos meus pais, pelo apoio constante e pelo sustento ao longo de todo o meu percurso académico — desde o Curso Técnico Superior Profissional em Viticultura e Enologia, passando pela Licenciatura em Agronomia na Escola Superior Agrária de Santarém, até à conclusão deste Mestrado.

Por fim, agradeço a todas as restantes amizades que foram surgindo e se fortaleceram ao longo deste percurso

Resumo

As alterações climáticas têm provocado mudanças consideráveis na temperatura do ar e na variabilidade da precipitação, com efeitos sobre a agricultura, especialmente em países da região do Mediterrâneo. Visando a identificação de áreas aptas ou não para o cultivo de uma determinada cultura diversos estudos têm utilizado o zonamento agroclimático. O presente trabalho insere-se nesta abordagem, tendo como objetivo realizar o zonamento agroclimático no Aproveitamento Hidroagrícola de Ceta (AHC) para duas pomoideas (maçã e pêra) e duas hortícolas (batata e couve).

Para a elaboração deste zonamento, foram recolhidos dados climáticos provenientes de estações meteorológicas do IPMA, SNIRH e COTHN, bem como dados de reanálise AgERA5 (Rean). Foram também obtidos dados do IFAP para identificação das culturas presentes no AHC. Inclui-se ainda informação sobre a capacidade de retenção de água do solo e a profundidade da água subterrânea. A primeira avaliação focou a integridade e a qualidade dos dados observados (Obs). Seguiu-se a avaliação comparativa entre os dados Obs e os da Rean e a correção de viés destes últimos.

Foram calculados indicadores agroclimáticos, como a acumulação térmica e as horas de frio.

Os resultados indicam que o AHC apresenta condições favoráveis para o cultivo das hortícolas estudadas. No caso das pomoideas, o número de horas de frio calculado foi relativamente baixo indicando a possibilidade de restrição ao seu cultivo num futuro de alterações climáticas.

A presente dissertação evidencia a importância da utilização de métodos de avaliação da integridade e qualidade dos dados. A adoção de dados de reanálise, após correção do viés, permite garantir a continuidade temporal dos dados e a representatividade espacial, permitindo um adequado zonamento agro-climático e visando o apoio à tomada de decisão na agricultura.

Palavras-chave: Dados meteorológicos de reanálise, qualidade dos dados, indicadores agroclimáticos, pomares de pomoideas, hortícolas.

Abstract

Climate change has caused high changes in air temperature and precipitation variability, with effects on agriculture, particularly in countries in the Mediterranean region. Aiming at identifying areas suitable or unsuitable for growing specific crops several studies have used agroclimatic zoning. The current study adopts this approach with the aim of carrying out agroclimatic zoning in the Cela Irrigation Scheme (AHC) for two pome fruits (apple and pear) and two vegetables (potato and cabbage).

This zoning was developed using climate data collected from IPMA, SNIRH and COTHN weather stations, as well as AgERA5 reanalysis data (Rean). Data was also obtained from IFAP in order to identify the crops present in the AHC. Soil water retention capacity and groundwater depth information were also considered. The first assessment focused on the integrity and quality of the observed data (Obs). Subsequently, the assessment compared the Obs data with the Rean data, followed by a bias correction of the latter.

Agroclimatic indicators such as growing degree days and chill hours were calculated.

The results suggest that the AHC offers favourable conditions for cultivating the selected vegetable crops. However, the low number of chill hours computed for pome fruits suggests that restrictions to their cultivation may be imposed in the event of future climate change.

This dissertation emphasises the importance of assessing and checking the quality of data. Adopting reanalysis data after bias correction enables temporal continuity and spatial representativity of the data, facilitating adequate agronomic zoning and supporting decision-making in agriculture.

Keywords: Reanalysis weather data, data quality assessment, agroclimatic indicators, pome fruits orchards, vegetable crops.

Índice

1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica	3
2.1 Alterações climáticas, variabilidade climática e os impactos na agricultura.....	3
2.2 Zonamento climático	5
2.2.1 Zonamento agroecológico	5
2.2.2 Zonamento bioclimático	6
2.2.3 Zonamentos agroclimáticos.....	11
2.3. Dados climáticos em grelha	14
2.4. Sistema de Informação Geográfica aplicados à agricultura de regadio	16
3. Material e Métodos	18
3.1. Área de Estudo.....	18
3.2. Fontes de Dados.....	19
3.2.1. Carta de solos	19
3.2.2. Profundidade da água subterrânea.....	20
3.2.2. Mapa das Culturas	21
3.2.3. Dados meteorológicos observados e de reanálise	23
3.3. Avaliação da qualidade e correção dos dados meteorológicos.....	25
3.4. Avaliação e correção dos dados de reanálise.....	27
3.5. Estimação da evapotranspiração da cultura de referência	30
3.6. Indicadores bioclimáticos selecionados para o zonamento	31
4. Resultados e discussão	34
4.1. Avaliação da qualidade dos dados meteorológicos observados	34
4.1.1. Temperatura	34
4.1.2. Humidade.....	37
4.1.3. Radiação.....	38
4.1.4. Velocidade do vento	39
4.1.5. Precipitação.....	40
4.1.6. Índice ombrotérmico de Gaussen.....	41
4.2. Avaliação da qualidade dos dados meteorológicos de reanálise e da necessidade de correção	43
4.2.5. Evapotranspiração da cultura de referência	51

4.3. Indicadores bioclimáticos	57
4.4. Cartografia de mapas temáticos	61
5. Conclusões e perspectivas futuras	64
Referências bibliográficas	I
6. Anexos	A

Índice de figuras

Figura 1- Simulação com dados de unidades de frio na região do Mediterrâneo para a concretização de cenários sendo: (a) mediana de Frio no Inverno (SWC) calculada em 10 cenários históricos simulados entre 1975 e 2019; (b) diferença de porções de frio entre os cenários históricos simulados entre 1975 e 2019. As cruzes vermelhas apresentam as estações meteorológicas. (Fernandez et al., 2023).	4
Figura 2 - Fluxograma a apresentar os passos necessários para realizar o zonamento agroecológico, adaptado de Nabati et al. (2020)	6
Figura 3 - Zonas de aridez segundo o Índice FAO-UNEP (Rosário et al., 2015)	8
Figura 4 - Exemplo de indicadores baseados em limiares térmicos utilizados na Península Ibérica entre 1993 e 2016: (a) SPR32 — dias com temperatura máxima superior a 32 °C (21 abril a 21 junho); (b) SU36 — dias com temperatura máxima superior a 36 °C (21 junho a 21 setembro); (c) SU40 — dias com temperatura máxima superior a 40 °C (21 junho a 21 setembro).....	9
Figura 5 - Uso dos indicadores (a) SPRTX (temperatura máxima média de abril a maio) e (b) GST (média de 7 meses da média das temperaturas máximas e mínimas diárias de abril a outubro) ao longo do período IP para o período de 1993 a 2016.....	9
Figura 6 - Zonamento agroclimático para Bixa orellana (L.) no estado de Minas Gerais, Brasil (Aparecido et al.;2018).....	12
Figura 7 - Distribuição espacial do conjunto de dados de reanálise (+) e localização das estações meteorológicas (●) na Península Ibérica (Martins et al., 2017).....	15
Figura 8 – Exemplo das diferentes camadas de informação que poderão ser incluídas num SIG aplicado à agricultura. Obtido em EcoTectonic	16
Figura 9 - Apresentação do AHC, onde se situa, as suas coordenadas e o sistema de informação geográfico que foi usado (https://sir.dgadr.gov.pt/pt/)	18
Figura 10 - Localização dos perfis do solo descritos na plataforma INFOSOLO próximos do Aproveitamento Hidroagrícola de Cela.....	19
Figura 11 - Mapa com os poços com dados sobre a profundidade da água no aquífero.....	21
Figura 12 - Exemplo de um gráfico com valores médios mensais de profundidade da toalha freática para o Aproveitamento Hidroagrícola de Cela.....	21
Figura 13- Mapa de culturas existentes no Aproveitamento Hidroagrícola de Cela e a sua classificação (Fonte: IFAP, 2023).....	21
Figura 14 - Mapa das parcelas com as culturas selecionadas para o zonamento agroclimático do AHC.....	22
Figura 15 - Representação esquemática de um NetCDF	23
Figura 16 - a) Apresentação das estações meteorológicas (●) com o ponto mais próximo (◆) sendo essas: b) São Pedro Mel, c) Aljubarrota, d) Alfeizerão, e) Fruticultura Vieira Natividade e Cela - COTHN e f) Cela – SNIRH	25
Figura 17 - Pontos da grelha AgERA5 considerados para o cálculo dos indicadores bioclimáticos.....	31
Figura 18 - Avaliação das temperaturas máxima (—) e a mínima (—) adquiridas na estação de São Pedro de Moel no ano de 2010.....	35
Figura 19 - Avaliação das temperaturas máxima (—) e a mínima (—) adquiridas na estação de São Pedro de Moel no ano de 2017	35

Figura 20 - Média mensal da temperatura máxima (a) e da mínima do ar (b) por mês relativos às estações meteorológicas de Cela -do SNIRH (2001 – 2023) (■), Fruticultura de Vieira da Natividade (1999 – 2023) (■), São Pedro de Moel (2019 – 2023) (■), Cela do COTHN (2011 – 2024) (■). Normal climatológica da estação meteorológica da Fruticultura de Vieira da Natividade relativa ao período 1981-2010 (—) e ao 1971-2000 de (—) e da estação meteorológica de São Pedro de Moel (—) relativa ao período 1971-2000.....	36
Figura 21 - Temperatura máxima absoluta e mínima absoluta por mês relativos às estações meteorológicas de Cela -do SNIRH (2001 – 2023) (■), Fruticultura de Vieira da Natividade (1999 – 2023) (■), São Pedro de Moel (2019 – 2023) (■), Cela do COTHN (2011 – 2024) (■). Normal climatológica da estação meteorológica da Fruticultura de Vieira da Natividade relativa ao período 1981-2010 (—) e ao 1971-2000 de (—) e da estação meteorológica de São Pedro de Moel (—) relativa ao período 1971-2000.	36
Figura 22 – Exemplo de dados diários de humidade relativa máxima (●) e mínima (●) da estação de Cela do COTHN no ano de 2011	37
Figura 23 - Apresentação de dados com valores da humidade relativa média por estação meteorológica.....	38
Figura 24 - Gráfico apresentando a R_s (●), adquiridas na estação de São Pedro de Moel no ano de 2016, a R_{so} (—) determinado pelo modelo da FAO56, com o R_{ajust} , sendo a correção diferente por trimestre: 1º Trimestre (○); 2º Trimestre (○); 3º Trimestre (○) e 4º Trimestre (○)	38
Figura 25 - Velocidade média do vento (—) da estação de São Pedro de Moel no ano de 2019.	39
Figura 26 - Médias mensais da velocidade média do vento das estações de Cela do COTHN (■), FVN (■), de Cela do SNIRH (■) e SPM (■)	39
Figura 27 - Precipitação acumulada anual para as estações meteorológicas de (a) Aljubarrota, (b) Cela-SNIRH, (c) Fruticultura Vieira Natividade e (d) e Alfeizerão.....	40
Figura 28 - Comparação de valores médios de precipitação acumulada mensal entre os observados (■) nas estações de (a) Aljubarrota, (b) Cela-SNIRH, (c) Fruticultura Vieira Natividade e (d) e Alfeizerão com a normal climatológica (1981-2010) da estação meteorológica Fruticultura Vieira Natividade (■).....	41
Figura 29 - Índice Ombrotérmico de Gausen calculado com os valores da temperatura média mensal (■) e a precipitação (■) das normais climatológicas por parte de: a) Fruticultura Vieira Natividade de 1971-2000 (---) 1981-2010 e b) São Pedro de Moel de 1971-2000.....	42
Figura 30 - Índice Ombrotérmico de Gausen das estações meteorológicas de a) Fruticultura de Vieira da Natividade (1999 – 2023), b) Cela – SNIRH (Precipitação:1984 – 2023 e Temperatura média: 2001 – 2023)	42
Figura 31 - Comparação entre os dados Obs (■,□) e de Rean (■,□) com a variável temperatura máxima (1) e mínima (2) nas estações: SPM (a); FVN(b); Cela do SNIRH (c)	44
Figura 32 - Regressão linear entre os valores observados da temperatura máxima e os valores de reanálise para o ponto ERA5 mais próximo para as estações a) Cela – SNIRH e b) FVN.....	45
Figura 33 - Comparação de dados médios mensais da humidade relativa entre as estações (□) e de Rean mais próximo (■) das estações (a) SPM e da (b) FVN e (c) Cela-SNIRH	46
Figura 34 – Exemplo da dinâmica da radiação solar R_s (●), adquiridas do ponto mais próximo da estação meteorológica de Cela do SNIRH no ano de 2003, com R_{so} (—) estimada usando a Equação 6 (Allen et al., 1998)	48
Figura 35 – Gráfico de extremos e quartis relativos aos dados de radiação solar da reanálise ERA5 (■) e observados (□) nas estações meteorológicas de (a) São Pedro de Moel (2010-	

2023), (b) Fruticultura de Vieira da Natividade (1999-2023) e (c) Cela do SNIRH (1984-2023). ● representam os valores espúrios.	49
Figura 36 – Comparação dos dados de radiação solar observados na Fruticultura Vieira Natividade (○) e os do ponto mais próximo da grelha da reanálise (●) e a radiação a céu limpo (R_{so}) (—).....	49
Figura 37 – Comparação da velocidade média entre as estações (□) e de Rean (■), na estação SPM(a), FVN(b) e Cela do SNIRH (c)	50
Figura 38 – Diagrama de extremos e quartis relativo à evapotranspiração de referência calculada com os dados observados (□) e com os dados de reanálise e velocidade do vento média das estações após correção (■) nas estações a) SPM, b) FVN, c) Cela - SNIRH.....	53
Figura 39 - Comparação de dados de precipitação acumulada anual entre os observados com os da reanálise, sendo as estações: (a)Aljubarrota; (b) Cela-SNIRH; (c) Fruticultura Vieira Natividade e (d) Alfeizerão	54
Figura 40 - Comparação de valores médios de precipitação acumulada mensal entre os observados (■) com os da reanálise (□) e da normal climatológica da estação Fruticultura Vieira Natividade (1981-2010) (□), sendo as estações: a) Aljubarrota (1984-2020); b) Cela (SNIRH) (1984-2023); c) Fruticultura Vieira Natividade (1999-2023) e d) Alfeizerão (1979-2023).....	55
Figura 41 - Comparação entre os dados Obs (□) e os de Rean (■)nas estações a) Aljubarrota, b) Cela do SNIRH, c) Fruticultura vieira Natividade e d) Alfeizerão com dados de precipitação acumulada por trimestre.....	57
Figura 42 – Comparação de horas de frio entre os dados Obs (□) com os de Rean (■) nas estações: a) Fruticultura de Vieira Natividade e b) Cela – SNIRH	59
Figura 43 – Determinação de horas de frio por Interpolação Geoespacial no AHC;	61
Figura 44 – Determinação de número de dias com stress térmico por interpolação geoespacial no AHC;	61
Figura 45 – Acumulação térmica com $T_b=3,5$ °C por Interpolação Geoespacial no AHC;	62
Figura 46- Acumulação térmica com $T_b=0$ °C aplicada comente para a cultura da pêra na fase da floração.....	62
Figura 47 - Acumulação térmica com $T_b=2$ °C por Interpolação Geoespacial no AHC;	62
Figura 48 - Acumulação térmica com $T_b=4,5$ °C por Interpolação Geoespacial no AHC	62
Figura 49 - Precipitação média acumulada no 1º Trimestre por Interpolação Geoespacial no AHC;.....	63
Figura 50 – Precipitação Média acumulada no 2º Trimestre por Interpolação Geoespacial no AHC	63
Figura 51 - Precipitação média acumulada no 3º Trimestre por Interpolação Geoespacial no AHC	63
Figura 52 - Precipitação média acumulada no 4º Trimestre por Interpolação Geoespacial no AHC	63

Índice de Quadros

Quadro 1 – Exemplos de indicadores bioclimáticos usados para fazer zonamentos	11
Quadro 2 - Exemplo de Indicadores usados para implementar o zonamento agro-climático.....	13
Quadro 3– Informação sobre os dados dos perfis do solo disponibilizado pole Infosolo para a região do aproveitamento, hidroagrícola de Cela	20
Quadro 4 -Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de temperatura máxima e mínima observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5).	45
Quadro 5 - Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de humidade relativa observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5).....	47
Quadro 6 - Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de radiação solar observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5).	49
Quadro 7 – Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de velocidade do vento observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5).....	51
Quadro 8 - Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de evapotranspiração de referência (ET_o) usando os dados observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5) com alternativa à velocidade do vento da reanálise	52
Quadro 9 - Resultados dos indicadores estatísticos da comparação dos dados de precipitação observada nas estações meteorológicas Aljubarrota, Fruticultura Vieira Natividade, da Cela-SNIRH, Alfeizerão e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5) antes e após a correção do viés.	56
Quadro 10 – Resultados dos indicadores bioclimáticos calculados para o ponto central do Aproveitamento hidroagrícola de Cela.	58

Lista de símbolos

<p>TEW: Água evaporável total (mm) TAW: Reserva utilizável de água no solo, mm θ_{fc}: Teor de água do solo à capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) θ_{wp}: Teor de água do solo ao coeficiente de emurchecimento permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) Z_e: Profundidade da camada evaporativa do solo (m) Z_r: Profundidade da raiz (m) K: Kelvins °C: Graus Celcius Dp: Temperatura do ponto de orvalho (°C) T: Temperatura (°C) T_{máx}: Temperatura máxima do ar (°C) T_{mín}: Temperatura mínima do ar (°C) T_{med}: Temperatura média do ar (°C) HR: Humidade Relativa do ar (%) RH_{avg}: Média da humidade relativa média (%) u_n: Velocidade do vento medida a n metros de altura (m s^{-1}) u_2: Velocidade do vento medida a 2 metros de altura (m s^{-1}) $u_{2 \text{ avg}}$: Média da velocidade do vento z: Altitude (m s^{-1}) d_2: distância euclidiana \hat{z}: Média ponderada no IDW TD_{avg}: Média da diferença entre a temperatura máxima da mínima do ar (°C) p: Latitude q: Longitude</p>	<p>R_{so}: Radiação solar a céu limpo ET_{o-PM}: Evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-Monteith ET_o: Evapotranspiração da cultura de referência (mm d^{-1}) R_s: Radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ou $\text{Watt m}^{-2} \text{d}^{-1}$) R²: Coeficiente de Determinação (adm.) RMSE: Raiz (quadrada) do erro médio quadrático (°C; %; $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; m/s; mm) NRMSE: Raiz (quadrada) do erro médio quadrático normalizado (%) PBIAS: Percentagem de viés (%) b_0: Constante de proporcionalidade (adm.) O_i: Dados observados \bar{O}: Média dos dados observados P_i: Dados estimados (reanálise) \bar{P}: Média dos dados estimados (reanálise) \hat{P}_i: Valor estimados da reanálise R_n: Radiação líquida à superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) G: Densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) Δ: Declive da curva de pressão a vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) γ: Constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) e_s: Pressão de vapor do ar à saturação (kPa) e_a: Pressão de vapor atual (kPa) k_{R_s}: Coeficiente empírico de ajustamento da radiação solar ($^\circ\text{C}^{-0.5}$) P: Precipitação (mm) PET_{mensal}: Evapotranspiração potencial mensal (mm d^{-1}) I_{anual}: Índice térmico anual (°C); y = bx+a: Equação da reta de regressão afim b: Declive a: Ordenada na origem y = b₀x: Reta de regressão forçada à origem k – Valor constante;</p>
---	---

Lista de abreviaturas

<p>ESA: Agência Espacial Europeia EUMETSAT: Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos ECMWF: Centro Europeu para as Previsões Meteorológicas a Médio Prazo EU: União Europeia OCDE: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico FAO: Food and Agriculture Organization IG: Informação Geográfica NN: Nearest Neighbor GP: Global Polynomial LP: Local Polynomial TSA: Trend Surface Analysis RBF: Radial Basic Function IDW: Inverse Distance Weighting AHC: Aproveitamento Hidroagrícola de Cela</p>	<p>QA: Avaliação da qualidade QC: Controlo da qualidade QGIS: Quantum Geographic Information System hf: Horas de frio; SPM: Estação meteorológica de São Pedro de Moel; FVN: Estação meteorológica de Fruticultura Vieira Natividade; IQR: intervalo interquartilico GDD: acumulação térmica IFAP: Instituto de Financiamento da Agricultura e Pescas IPMA: Instituto Português do Mar e Da Atmosfera COTHN: Centro Operacional e Tecnológico Hortofruticultura Nacional SNIRH: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos IDW: Inverse Distance Weighted ISIP: Sistema de Identificação Parcelar</p>
---	---

1. Introdução

A importância deste estudo resulta do aumento da variabilidade climática decorrente das alterações climáticas (Lionello et al., 2017; Pachauri & Reisinger, 2007; Saadi et al., 2015; Tanasijevic et al., 2014), sendo a temperatura e a precipitação as variáveis mais afetadas, o que compromete a gestão agrícola e florestal. Nos países da região do Mediterrâneo, projeta-se um aumento das temperaturas e da frequência de períodos de seca, o que poderá reduzir a disponibilidade de água e, conseqüentemente, a produtividade das culturas agrícolas (Freitas et al., 2024; Pachauri & Reisinger, 2007; Rolim et al., 2017; Soares et al., 2025). As explorações agrícolas são particularmente vulneráveis à variação climática, o que poderá causar impactos significativos no futuro nomeadamente em termos da sua sustentabilidade (Shukla et al., 2019). Alterações simultâneas na precipitação e na temperatura podem resultar em secas mais severas, afetando negativamente tanto o desenvolvimento como o rendimento das culturas — sobretudo as de sequeiro, que são mais expostas ao stress hídrico (Bento et al., 2021; Ray et al., 2019). O estudo de Tsadilas et al. (2023), realizado na Grécia, reportou projeções climáticas com redução da precipitação, aumento da temperatura e maior intensidade e duração dos períodos de seca. Estes fatores foram identificados como os principais responsáveis por prejuízos em culturas como cereais, hortícolas, olivais e vinha, especialmente nas regiões centro e sul do país, provocando impactos económicos negativos. Nesse mesmo estudo, foi considerado o uso do zonamento agroclimático como ferramenta para avaliar a aptidão das diferentes regiões para as culturas em análise. Este tipo de zonamento tem vindo a ganhar relevância por permitir a identificação de áreas adequadas (ou não) para o cultivo de uma dada cultura, com base nas condições climáticas existentes ou projetadas. Para tal, é essencial dispor de séries longas de dados meteorológicos, preferencialmente de frequência diária, geralmente recolhidos por estações meteorológicas. No entanto, por vezes essas séries estão incompletas, devido a falhas no registo ou por falta de qualidade dos dados decorrentes da manutenção inadequada dos equipamentos, ou não existem para determinadas localizações (Garcia et al., 2020; Paredes et al., 2020). Então usaram-se os dados de reanálise, sendo estes provenientes de um método científico que procura estimar, as condições meteorológicas ao longo das últimas décadas. Baseia-se de observações meteorológicas passadas, provenientes de todo o mundo, integradas num modelo computacional de previsão meteorológica. São de acesso livre através de plataformas como Copernicus¹, NASA², NOAA³ ou CR⁴, estando organizados em grelhas com variadas

1-<https://climate.copernicus.eu/>;

2- <https://data.nasa.gov/>

3-<https://www.noaa.gov/>

4-<https://climatoreanalyzer.org/>;

resoluções espaciais, por exemplo, 30 m a 11 km. Após a seleção da base de dados, é fundamental avaliar a qualidade dos dados e, se necessário, aplicar correções, utilizando indicadores estatísticos.

Este procedimento é crucial para garantir a fiabilidade dos dados para aplicação em estudos climáticos. Diversos estudos têm validado estas séries de dados, nomeadamente em Portugal (Almeida e Coelho 2023; Garcia et al., 2025; Martins et al., 2017; Paredes et al., 2018). Uma vez avaliados e corrigidos, os dados de reanálise revelam-se úteis para diversas aplicações, incluindo o zonamento agroclimático.

O principal objetivo do presente estudo consiste em realizar o zonamento agroclimático do Aproveitamento Hidroagrícola de Ceta (AHC), com vista a disponibilizar aos agricultores uma ferramenta de apoio à tomada de decisão. Os resultados são apresentados sob a forma de mapas, permitindo visualizar a aptidão do AHC para determinadas culturas.

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. O primeiro corresponde à revisão bibliográfica, abordando o conhecimento existente e as metodologias utilizadas. O segundo descreve os materiais e métodos aplicados. O terceiro capítulo apresenta e discute os resultados. Por fim, são expostas as principais conclusões e perspetivas futura

2. Revisão bibliográfica

2.1 Alterações climáticas, variabilidade climática e os impactos na agricultura

A alteração numa determinada variável meteorológica pode provocar modificações no regime climático de uma região, podendo inclusive influenciar o valor médio observado ao longo de um dado período. A variabilidade climática refere-se à oscilação dos valores médios do clima em escalas temporais anuais e de longo prazo, como décadas e séculos (Dinse, 2011). Esta variabilidade pode ser aferida recorrendo às normais climatológicas. Como consequência dessa variabilidade, o comportamento climático de um local pode apresentar diferenças interanuais, mesmo quando analisado em períodos equivalentes (Smith, 2010).

A caracterização do clima de uma região ou local assenta, tradicionalmente, em séries temporais com, pelo menos, 30 anos de dados meteorológicos. Estas séries permitem o cálculo de parâmetros como a média e a amplitude das variáveis climáticas, os quais são utilizados para estabelecer as normais climatológicas — fundamentais para a monitorização e representação do clima de uma determinada região (Dinse, 2011).

As mudanças climáticas referem-se a alterações sistemáticas nos valores médios e na variabilidade das condições meteorológicas, resultantes quer de processos naturais, quer da interferência antrópica. Desde o período pré-industrial, as atividades humanas têm desempenhado um papel relevante na intensificação dessas alterações (Dinse, 2011; Smith, 2010; Teixeira & Rolim, 2014).

As alterações climáticas representam uma preocupação crescente para o setor agrícola, devido às incertezas associadas à produtividade, à disponibilidade de água quer em termos de precipitação como de humidade no solo, à ocorrência de secas e ao impacto nos ciclos de pragas e doenças das culturas (Raza et al., 2019; ElMassah, 2013; Huang et al., 2011). No entanto, em certos contextos, estas alterações podem também resultar em efeitos positivos, como o aumento da produtividade, uma maior taxa de maturação das culturas, ciclos culturais mais longos ou até mesmo a introdução de novas culturas (Raza et al., 2019).

Os impactos negativos das alterações climáticas podem verificar-se tanto em culturas anuais como em culturas perenes. Vários estudos centrados na bacia do Mediterrâneo preveem que a cultura da maçã poderá ser ameaçada pelo aumento das temperaturas, nomeadamente pela falta

de número suficiente de horas de frio (Benmoussa et al. 2018; Campoy et al. 2011; El Yaacoubi et al. 2014).

No estudo realizado por Fernandez et al., (2023), com foco na Europa, foram analisadas as unidades de frio acumulada no período 1975 e 2019 considerando seguro quando 90% dos anos acumulam as necessidades de frio, garantindo uma viabilidade agronômica de espécies ou variedades que requerem certo número de unidades de frio para germinarem e frutificar (Luedeling et al, 2011) (Figura 1). Concluiu-se que países como Portugal, Espanha, Grécia e Turquia têm vindo a registar uma redução significativa de unidades de frio.

Segundo Malhotra (2017), é fundamental enfrentar os desafios colocados pelas alterações climáticas, entre os quais se destacam os eventos extremos como chuvadas concentradas no tempo, inundações, granizo e geadas

tardios, temperaturas extremas e secas. Estes fenómenos podem provocar uma redução do ciclo cultural, menor disponibilidade de água e vernalização deficiente, o que compromete a produtividade.

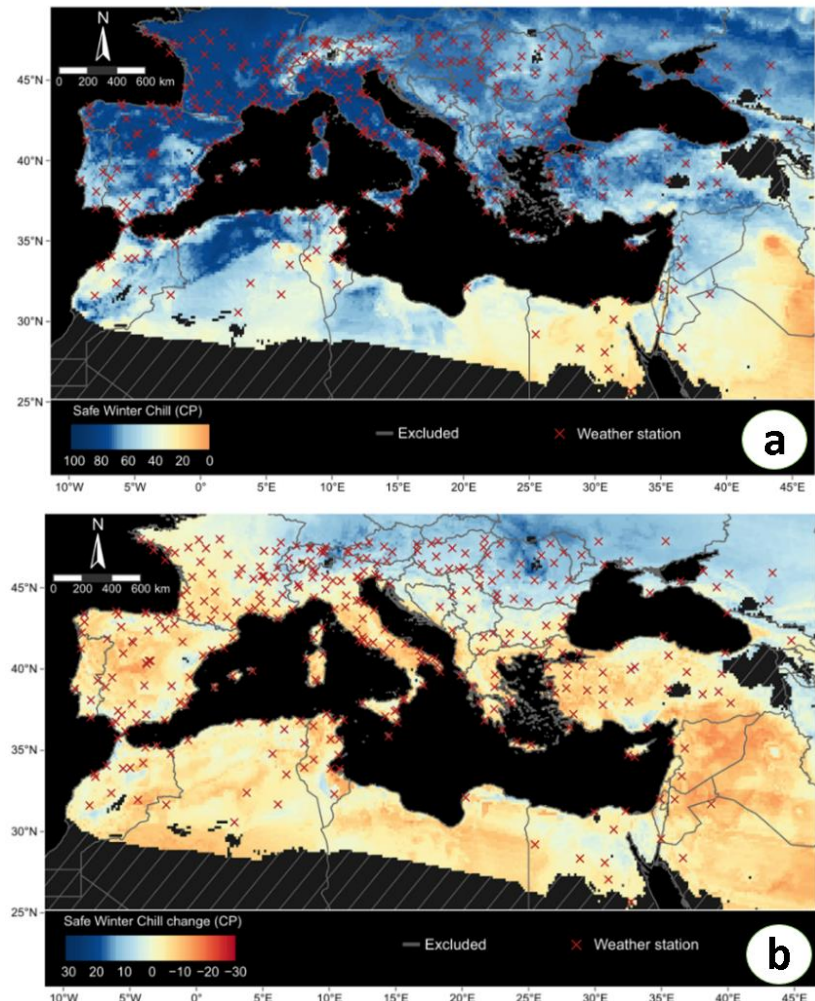


Figura 1- Simulação com dados de unidades de frio na região do Mediterrâneo para a concretização de cenários sendo: (a) mediana de Frio no Inverno (SWC) calculada em 10 cenários históricos simulados entre 1975 e 2019; (b) diferença de porções de frio entre os cenários históricos simulados entre 1975 e 2019. As cruces vermelhas apresentam as estações meteorológicas. (Fernandez et al., 2023).

2.2 Zonamento climático

O zonamento climático pode ser definido com base em distintas variáveis e adotando nomenclaturas específicas. Nesse contexto, distinguem-se três categorias principais: zonamento agroecológico, bioclimático e agroclimático, cujas definições, fundamentos metodológicos e casos de estudo são detalhados nas subsecções seguintes.

2.2.1 Zonamento agroecológico

O zonamento agroecológico (AEZ), segundo a FAO, define zonas com base nas características do solo, relevo e clima, permitindo dividir áreas de acordo com o seu potencial produtivo e os impactos ambientais associados. O resultado é um mapeamento que identifica zonas agroecológicas (FAO, 1996).

Vários estudos demonstram que o AEZ, baseado em variáveis ambientais, é eficaz na identificação de áreas adequadas para a instalação de culturas (Seo, 2014; Vrieling et al., 2013). Frequentemente, estas variáveis são espacializadas usando Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilitando a sua análise e representação sob a forma de mapas ou relatórios. Os AEZ's abrangem uma vasta gama de aplicações, nomeadamente na análise de produtividade (Van Wart et al., 2013), na avaliação dos impactos das alterações climáticas (Fischer et al., 2005, 2007) ou de medidas de adaptação às mudanças climáticas (Seo, 2011).

Nabati et al. (2020), elaboraram diferentes mapas e aplicaram o zonamento agroecológico de uma região semiárida do oeste do Irão com 28 691 km², com o objetivo de identificar áreas adequadas ao cultivo de grão-de-bico. Seguiram a metodologia sumarizada na Figura 2 a qual inclui o desenvolvimento de mapas correspondentes a vários tipos de zonamento — agroclimático, agrotopográfico, agroedáfico e de uso do solo agrícola — e recorreram ao software ArcGIS para processar os dados “*raster*” de cada um desses zonamentos. O produto final foi o zonamento agroecológico integrado da região em estudo (Figura 2).

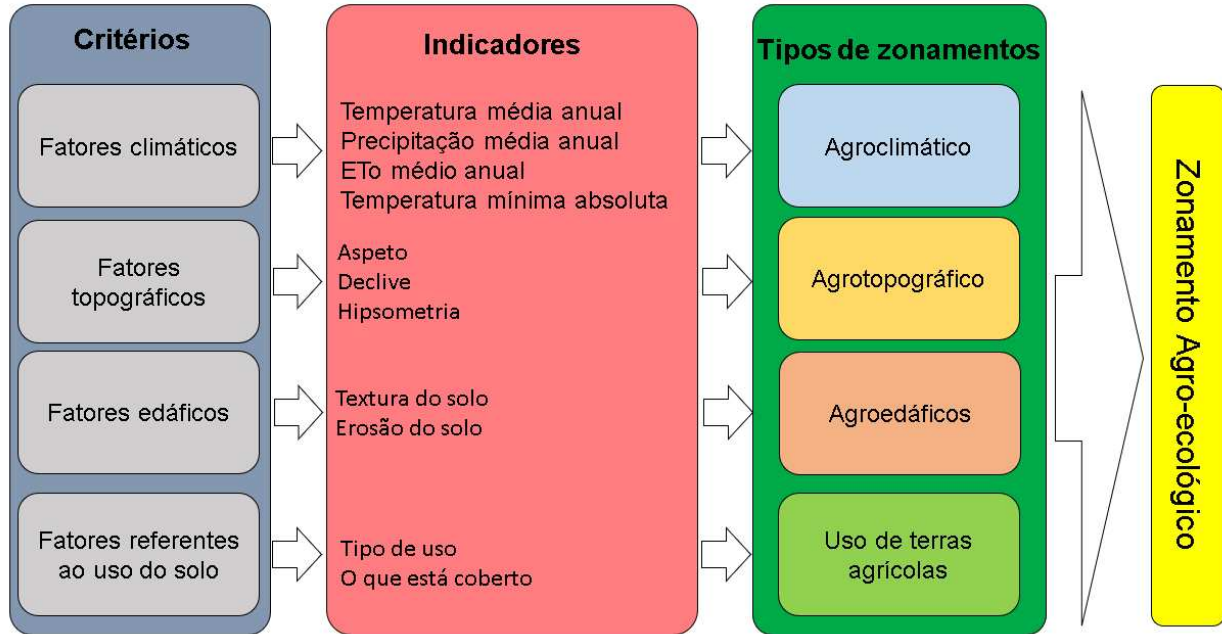


Figura 2 - Fluxograma a apresentar os passos necessários para realizar o zonamento agro-ecológico, adaptado de Nabati et al. (2020)

Outra metodologia foi seguida e detalhada no estudo de Chen (2001) no qual foram identificadas zonas agroecológicas com base na cultura agrícola instalada, a sua produtividade, a disponibilidade de água, temperatura e relevo. Vários estudos na literatura seguiram a metodologia proposta por Chen (2001) como por exemplo o estudo desenvolvido por Jin & Zhu (2008) no nordeste da China e focando a cultura do milho, no qual dividiram a região em três zonas agroecológicas, concluindo que poderá ocorrer uma redução no rendimento do milho. Já o estudo de Yang et al. (2008), focou várias culturas de cereais e hortícolas e identificou treze zonas agroecológicas no noroeste da China.

2.2.2 Zonamento bioclimático

A Bioclimatologia é uma ciência que estuda a relação entre os seres vivos e o clima. Distingue-se da Climatologia por incorporar análises biológicas, nomeadamente ligadas às plantas (Cano-Ortiz et al., 2024). O bioclima fornece informações essenciais sobre as condições climáticas que influenciam os organismos vivos (O'Donnel & Ignizio, 2012). Em contexto agrícola, os dados bioclimáticos podem ser usados para avaliar o potencial de uma determinada área quanto à escolha das culturas e respetivas variedades (Chemura et al., 2016). Os indicadores bioclimáticos são amplamente utilizados, podendo ser obtidos a partir de dados observados ou modelados (Noce et al., 2020). Segundo Abreu (2018) estes indicadores foram concebidos para sintetizar séries climáticas, permitindo acompanhar e classificar climas, sendo que o seu grau de complexidade varia consoante a metodologia.

Existem diversas bases de dados que disponibilizam indicadores bioclimáticos, como o WorldClim (Fick & Hijmans, 2017; Hijmans et al., 2005); CHELSA (Karger et al., 2017, 2020); CliMond (Kriticos et al., 2012, 2014); ecoClimate (Lima-Ribeiro et al., 2015); ENVIREM (Title & Bemmels, 2018) e MERRAclim (Vega et al., 2017).

Entre os indicadores bioclimáticos, destaca-se a evapotranspiração da cultura, que resulta da combinação da evaporação do solo com a transpiração das plantas, representando o transporte de água do solo até à atmosfera (Thornthwaite, 1948). Dentro deste conceito, distinguem-se dois tipos principais: a evapotranspiração de referência (ET_0) e a evapotranspiração potencial (PET). Embora ambos os indicadores sirvam propósitos semelhantes, diferem nas suas definições e nos modelos que os sustentam. A principal distinção entre a ET_0 e a PET reside no conceito subjacente a cada uma. A ET_0 refere-se à taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética, cujas características foram parametrizadas de modo a representarem a procura evaporativa da atmosfera. Assim, esta cultura assemelha-se a uma superfície extensa de relva verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, bem regada e que sombreia completamente o solo tem uma altura padrão de 0,12 m, resistência superficial fixa de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23, (Allen et al., 1998). A PET corresponde à quantidade máxima de água transpirada e evaporada por uma cultura, num determinado período, que cobre totalmente o solo e com uma quantidade adequada de humidade no solo para o pleno desenvolvimento vegetal. Porém, a sua aplicação tem gerado alguma confusão em termos de conceito ao longo das décadas, existindo diferença nos mesmos (Allen et al., 1998; Irmak & Haman, 2003). Na estimativa da PET o método empírico desenvolvido por Thornthwaite (1948) e a equação de Hargreaves & Samani (1982) são os mais utilizados. A PET é usada no cálculo do Índice de Aridez (IA) proposto pela UNEP (1992), definido como a razão entre a precipitação (P) e a PET (Bahrami et al., 2019; Dave et al., 2019; Paredes et al., 2020; Soares et al., 2025; Wen et al., 2018). A aridez constitui um regime xérico natural e é caracterizado por uma precipitação média anual baixa a muito baixa, e grande variabilidade espacial e temporal da precipitação (Pereira et al., 2009). Pode resultar de um aumento da temperatura média (García-Ruiz et al., 2011), acompanhado por maior evapotranspiração (García-Ruiz et al., 2011; Pérez-Cutillas et al., 2018) .

Assim, existem seis tipos de clima segundo o índice de aridez da UNEP, incluindo: Hiperárido ($AI < 0,05$); Árido ($0,05 \leq AI < 0,20$); Semiárido ($0,20 \leq AI < 0,50$); Subúmido seco ($0,50 \leq AI < 0,65$),

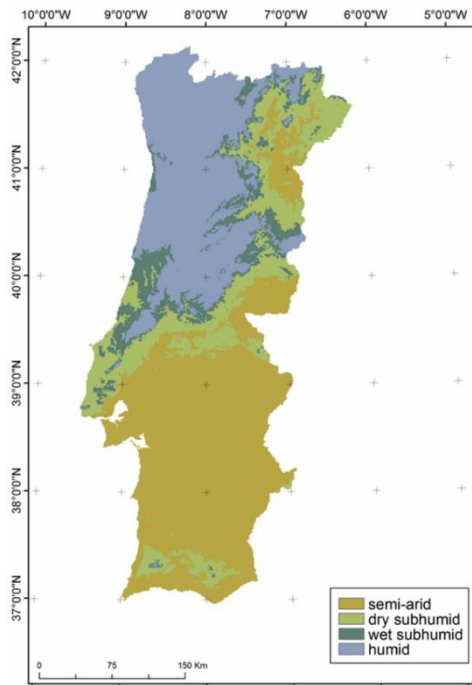


Figura 3 - Zonas de aridez segundo o Índice FAO-UNEP (Rosário et al., 2015)

subúmido húmido ($0,65 \leq AI < 1,0$) e Húmido ($AI \geq 1,0$) (Bahrami et al., 2019; Dave et al., 2019; Delgado-Baquerizo et al., 2018; Paredes et al., 2020; Soares et al., 2025; Wen et al., 2018). O conhecimento destes padrões permite avaliar a escassez hídrica e os seus impactos ambientais, sociais e económicos (Naumann et al., 2018).

Em Portugal, Rosário et al. (2015), aplicaram este método para avaliar o índice de aridez, como representado na Figura 3.

Para além do IA, outro indicador amplamente utilizado em estudos agrícolas é a acumulação térmica ou graus-dia de crescimento (GDD), que também pode ser utilizada em estudos de zonamento (Freitas et al., 2023; Slack et al., 1994; Soares et al., 2025). Este índice baseia-se na acumulação de temperatura acima de um valor mínimo de

temperatura denominada temperatura-base (T_b), abaixo da qual a planta não se desenvolve. Cada grau de temperatura média acima desse limite conta como um grau-dia acumulado, sendo este valor específico para cada cultura e para cada fase fenológica (Arnold, 1959; Bonhomme, 2000; Camargo, 1984; Garcia et al., 2025; Pereira et al., 2025).

Existem diferenças metodológicas no cálculo dos GDD consoante as espécies e os modelos utilizados (Arnold, 1959; Bonhomme, 2000; Dufault, 1997; Ometto, 1981; Snyder, 1985). A metodologia mais comumente usada em modelos de produção inclui quer a T_b , como uma outra temperatura que representa o limite superior (T_{upper}), acima da qual o desenvolvimento da planta pode ser comprometido (McMaster and Wilhelm, 1997; Steduto et al., 2012).

Estudos recentes têm aplicado múltiplos indicadores bioclimáticos. Chou et al. (2023), por exemplo, utilizaram cinco indicadores para definir práticas culturais em olival com base em variáveis como: temperatura máxima na primavera, número de dias de calor na primavera e verão e temperatura durante a fase de crescimento. Estes indicadores referem-se frequentemente a limiares térmicos específicos, como o número de dias com temperaturas acima de determinados

valores nas estações de primavera e verão (Figura 4), ou às médias das temperaturas máximas e mínimas (Figura 5).

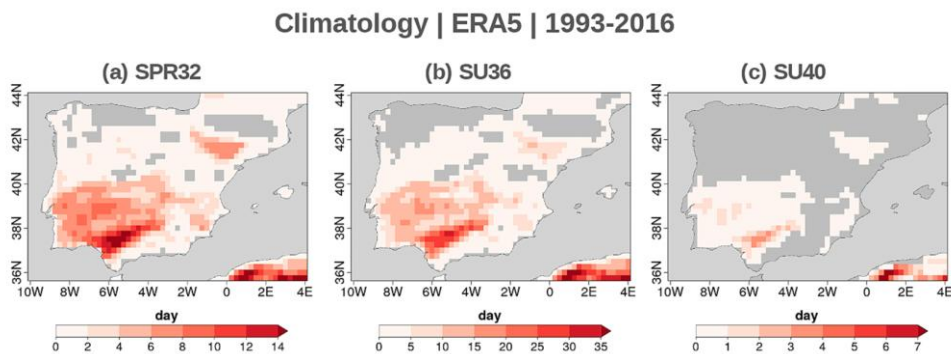


Figura 4 - Exemplo de indicadores baseados em limiares térmicos utilizados na Península Ibérica entre 1993 e 2016: (a) SPR32 — dias com temperatura máxima superior a 32 °C (21 abril a 21 junho); (b) SU36 — dias com temperatura máxima superior a 36 °C (21 junho a 21 setembro); (c) SU40 — dias com temperatura máxima superior a 40 °C (21 junho a 21 setembro)

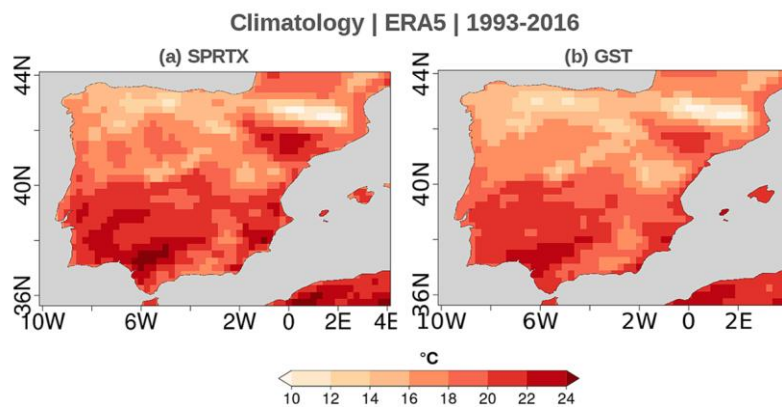


Figura 5 - Uso dos indicadores (a) SPRTX (temperatura máxima média de abril a maio) e (b) GST (média de 7 meses da média das temperaturas máximas e mínimas diárias de abril a outubro) ao longo do período IP para o período de 1993 a 2016

Em Itália, Massano et al. (2023), utilizaram cinco indicadores baseados na temperatura e dois na precipitação. Os indicadores térmicos incluíram: temperatura média durante o período de vegetação (Eccel et al., 2016; Malheiro et al., 2013), índice heliotérmico de Huglin (Huglin, 1978; Tonietto & Carbonneau, 2004), graus-dia de Winkler (Amerine & Winkler, 1944; Eccel et al., 2016; Piña-Rey et al., 2020), graus-dia biologicamente efetivos (Gladstones, 1992, 2011) e índice de noites frias (Moriondo et al., 2011; Tonietto & Carbonneau, 2004). Quanto aos indicadores baseados na precipitação, destacam-se o índice de precipitação da estação de crescimento (Blanco-Ward et al., 2007, 2017; Piña-Rey et al., 2020) e índice de chuva de primavera (Dell'Aquila et al., 2023). O serviço climático Copernicus, é parte do programa de observação da Terra da União Europeia, disponibiliza dados de cenários de alterações climáticas, com dados

em grelha para indicadores bioclimáticos referentes à Europa, Norte do Brasil e África Central. Estes dados fornecem informações sobre os efeitos do clima nos ecossistemas e na biodiversidade (Berckmans et al., 2020). Por exemplo, no estudo de Fonseca et al. (2022), foram analisados os impactos das alterações climáticas na gestão da água para o setor agrícola na Península Ibérica. Os indicadores utilizados incluíram: temperatura média anual, sazonalidade térmica, precipitação anual, sazonalidade da precipitação, aridez média anual e volume médio anual de água no solo. Os resultados indicaram um aumento previsto da temperatura média anual, um agravamento da aridez e uma redução tanto da precipitação como da água disponível no solo. O Quadro 1 apresenta os indicadores referidos nesta secção.

2.2.3 Zonamentos agroclimáticos

Como anteriormente referido o setor agrícola é altamente dependente das condições ambientais. Entre estas, o clima é um dos fatores mais determinantes das potencialidades agrícolas de uma região, influenciando diretamente a aptidão para o cultivo de culturas específicas. Compreender o clima de uma região é essencial para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de sistemas agrícolas, para a formulação de programas de investigação e para o estabelecimento de estratégias de gestão eficiente dos recursos naturais (Reddy, 1983). Uma abordagem prática consiste na classificação de zonas agroclimáticas com base nas variáveis meteorológicas que mais influenciam o crescimento e o rendimento das culturas (Mekonnen Weldegerima et al., 2023). O zonamento agroclimático visa identificar áreas com características homogéneas em termos de potencialidade agrícola, permitindo a formulação de políticas e práticas específicas para cada região (Antoine, 1997). Cunha et al. (2011) aplicaram o zonamento agroclimático à cultura do trigo em regiões desde o Centro até ao Sul do Brasil, tendo em consideração as limitações meteorológicas ao longo do ciclo da cultura. As zonas foram agrupadas em três grandes categorias de acordo com a casificação climática de Köppen-Geiger (temperadas, subtropicais e tropicais), e subdivididas em quatro classes de aptidão (aptas; aptas com rega para sementeira de inverno; aptas para sementeira de verão sem rega e de inverno com rega; e inaptas).

Outro estudo realizado no Brasil, Aparecido et al. (2018) realizaram um zonamento agroclimático do estado de Minas Gerais, para avaliar a aptidão da região à produção de colorau (*Bixa orellana*), uma árvore tropical nativa da América do Sul, cujos frutos são utilizados na indústria alimentar, cosmética e farmacêutica. O estudo baseou-se em dois critérios: temperatura média e precipitação anual. Consideraram inaptas as áreas com temperaturas médias inferiores a 22 °C ou superiores a 27 °C.

Quadro 1 – Exemplos de indicadores bioclimáticos usados para fazer zonamentos

Indicadores bioclimáticos	Citações
Índice de aridez	Bahrami et al., 2019; Dave et al., 2019; Delgado-Baquerizo et al., 2018; Paredes et al., 2020; Soares et al., 2025; Wen et al., 2018 Rosário et al., 2015
Acumulação térmica	Freitas et al., 2023; Slack et al., 1994; Soares et al., 2025 Bonhomme, 2000; Camargo, 1984; Garcia et al., 2025; Pereira et al., 2025; Arnold, 1959; Dufault, 1997; Ometto, 1981; Snyder, 1985 McMaster and Wilhelm, 1997; Steduto et al., 2012
Evapotranspiração Potencial	Thornthwaite, 1948 Allen et al., 1998 Irmak & Haman, 2003 Hargreaves & Samani, 1982
Temperatura média durante o período de vegetação	Eccel et al., 2016; Malheiro et al., 2013
Índice heliotérmico de Huglin	Huglin, 1978; Tonietto & Carbonneau, 2004
Graus-dia de Winkler	Amerine & Winkler, 1944; Eccel et al., 2016; Piña-Rey et al., 2020
Graus-dia biologicamente efetivos	Gladstones, 1992, 2011
Índice de noites frias	Moriondo et al., 2011; Tonietto & Carbonneau, 2004
Índice de precipitação da estação de crescimento	Blanco-Ward et al., 2007, 2017; Piña-Rey et al., 2020
Índice de chuva de primavera	Dell'Aquila et al., 2023
Temperatura média anual Sazonalidade térmica Precipitação anual Sazonalidade da precipitação Aridez média anual Volume médio anual de água no solo	Fonseca et al., 2022

Para as regiões com temperaturas compreendidas entre esses limites, aplicou-se um segundo critério relacionado com a precipitação anual; assim, se esta fosse inferior a 800 mm, considerava-se existir escassez hídrica; entre 800 e 1600 mm, a região era considerada apta

apoio à decisão, especialmente na avaliação da disponibilidade hídrica e na definição de culturas apropriadas em contextos como o dos aproveitamentos hidroagrícolas. Akbar et al., (2025) estudaram seis distritos em Punjab, com base nas zonas agroclimáticas definidas pela FAO, para a rega do trigo. A evapotranspiração foi calculada pelo método ETo-PM, usando dados climáticos de 2013 a 2023, concluindo que há menor necessidade de água no início da vegetação e maior ao longo do desenvolvimento da cultura. Noreldin et al. (2016) definiram zonas com zonamento agroclimático em antigas terras cultivadas no Delta e Vale do Nilo, no Egito, usando dados climáticos entre 1985 e 2014 para facilitar e melhorar a gestão da água de rega em condições de escassez. Usaram modelos para determinar as médias anuais de evapotranspiração potencial e o coeficiente de determinação (R^2) na relação entre esta e o clima em estudo. Definiram sete zonas, aumentando a capacidade de implementar políticas mais eficientes na gestão da água, promovendo maior disponibilidade de informação e eficiência nos recursos hídricos. O Quadro 2 apresenta os zonamentos implementados e respectivos indicadores.

Quadro 2 - Exemplo de Indicadores usados para implementar o zonamento agro-climático

Indicadores Agro-climáticos		Citações
Zonamento Agro-climático para cultura uruku		Aparecido et al. 2018
22 °C < T _{med} < 27 °C	Apta	
800 mm < Prec < 1600 mm		
T _{med} < 20 °C	Inapta	
T _{med} > 27 °C		
Prec < 800 mm		
Prec > 1600 mm		
Zonamento agroclimático para a cultura da banana no Brasil		Souza et al. 2022
20 °C < T _{med} < 29 °C	Apta	
1200mm < Prec < 1900mm		
30% < Argila(%) < 55%	Inapta	
T _{med} < 20 °C		
T _{med} > 29 °C		
Prec < 1200 mm		
Prec > 1900 mm		
Argila(%) < 30%		
Argila(%) > 55%		
Zonamento agroclimático para a cultura do pinhão-manso		Yamada & Sentelhas, 2014
23 °C < T _{med} < 27 °C	Apta	
361 mm < Prec < 720 mm		
15°C < T _{min} < 22,9°C	Limitações fisiológicas	
27,1 °C < T _{max} < 28 °C		
T _{min} < 15 °C	Inaptas	
T _{max} > 28 °C		
Perc < 361 mm	Áreas inadequadas	
Prec > 720 mm		

2.3. Dados climáticos em grelha

Certos modelos são úteis para prever o rendimento e melhorar a tomada de decisão. Dados climáticos são necessários para o uso destes modelos. Contudo, a maioria dos países em desenvolvimento dispõe de dados meteorológicos de má qualidade, razão pela qual são usados dados em grelha, obtidos a partir de várias fontes (Rasera et al., 2023). Existem várias fontes de dados meteorológicos em grelha, incluindo aquelas baseadas em dados observacionais, ou seja, em dados recolhidos por estações meteorológicas e posteriormente interpolados para uma grelha espacial fixa. Este tipo de procedimento permite transformar medições pontuais, com cobertura espacial limitada, em grelhas de dados contínuos espacial e temporalmente das diferentes variáveis meteorológicas. São exemplo destas bases de dados, a E-OBS (Anwar et al., 2023), que foca a Europa, Iberia01 (Herrera et al., 2019), a qual foca a península Ibérica e Climate Research Unit Time Series (CRU) (Harris et al., 2020), que tem uma abrangência global. No grupo de outras bases de dados que fornecem apenas médias de séries longas de dados incluem-se a CLIMWAT 2.0 (Smith, 1993) e a WorldClim (Hijmans et al., 2005) ambas focam o globo. Existem também fontes de dados meteorológicos em grelha, mas gerados através de métodos que combinam observações meteorológicas com modelos numéricos aplicados à escala global, com o objetivo de estimar as condições meteorológicas ao longo do tempo. São denominados dados de reanálise. A sua relevância reside na ampla disponibilidade de variáveis meteorológicas, superando muitas vezes as limitações das observações convencionais, que dependem dos instrumentos disponíveis nas estações meteorológicas. Para além disso, a reanálise permite obter dados para locais onde não existem observações diretas, colmatando lacunas espaciais na cobertura dos dados. Os dados de reanálise são organizados em grelhas regulares e abrangem séries temporais contínuas. De entre as bases de dados de reanálise destacam-se MERRA-2¹, Copernicus European Regional Reanalysis (CERRA)² Um exemplo amplamente utilizado é o conjunto de dados ERA5, disponibilizado pelo Programa Copernicus, uma iniciativa da Comissão Europeia em parceria com os Estados-Membros, a Agência Espacial Europeia (ESA), a Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), o Centro Europeu para as Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF), outras agências da União Europeia e a Mercator Océan (Copernicus, 2015).

Estas informações estão acessíveis através do Climate Data Store (CDS), uma plataforma que fornece acesso a diversos conjuntos de dados, incluindo reanálises climáticas.

1- https://gmao.gsfc.nasa.gov/gmao-products/reanalysis-products?utm_source=chatgpt.com

2- https://climate.copernicus.eu/copernicus-regional-reanalysis-europe/cerra?utm_source=chatgpt.com

O ERA5 corresponde à quinta geração de reanálises produzidas pelo ECMWF e permite analisar o clima e as condições meteorológicas a nível global. Abrange dados desde 1979 até ao presente, sendo atualizado regularmente. Este produto é desenvolvido no âmbito do Copernicus Climate Change Service (C3S) e os dados são arquivados no ECMWF. (Bell et al., 2021)

O ERA5 integra modelos climáticos e dados observacionais globais e tem capacidade de atualização diária, o que o torna particularmente útil para estudos ambientais, agrícolas e climáticos. Tem uma resolução temporal horária e uma resolução espacial de aproximadamente 11 km x 11 km (Boogaard et al., 2020).

Um exemplo de aplicação do ERA-Interim (30 km x 30 km) foi apresentado por Martins et al. (2017), que utilizaram os seus dados para comparar com observações meteorológicas locais, conforme ilustrado na Figura 7.

Rasera et al. (2023) avaliaram a qualidade de dois conjuntos de dados climáticos em grelha para preencher lacunas nas estações meteorológicas. Compararam estes dados com observações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), analisando variáveis como precipitação e temperatura num modelo agrometeorológico para estimar a produtividade da *Citrus sinensis*.

Segundo os seus resultados, as comparações entre as bases de dados apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) elevado e boa correlação para as temperaturas máxima e mínima. Contudo, registaram-se maiores erros relativos à precipitação, devido à sua elevada variabilidade espacial.

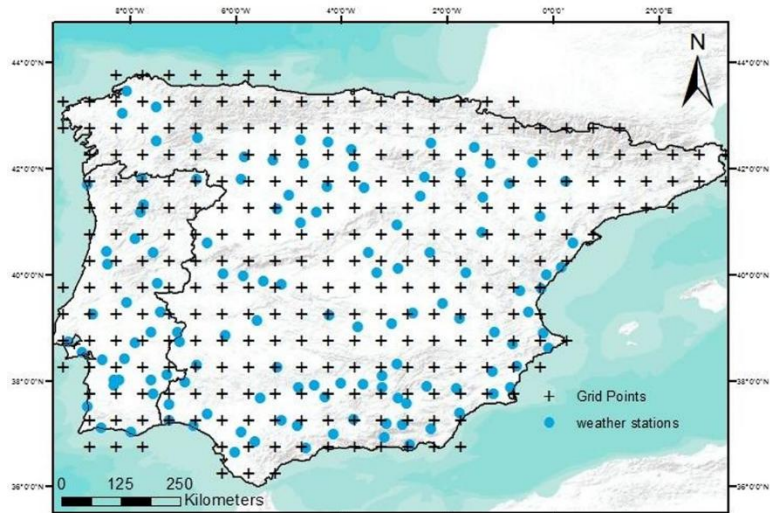


Figura 7 - Distribuição espacial do conjunto de dados de reanálise (+) e localização das estações meteorológicas (●) na Península Ibérica (Martins et al., 2017).

2.4. Sistema de Informação Geográfica aplicados à agricultura de regadio

Vários estudos sobre temas relacionados com a rega, têm sido realizados dada a importância da gestão da água em condições de escassez de hídrica (Goodchild et al., 2005). Surge, assim, a necessidade de uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos na agricultura de regadio, acompanhada da aquisição de conhecimentos científicos sobre variáveis como: clima; características do solo e a sua utilização; escolha de culturas; disponibilidade de água e redes de distribuição (Figura 8). Os dados destas variáveis são disponibilizados e armazenados em bases de dados nomeadamente Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Su e Wen, 2001; Bioggio e Ding, 2001; Kjelds e Storm, 2001).

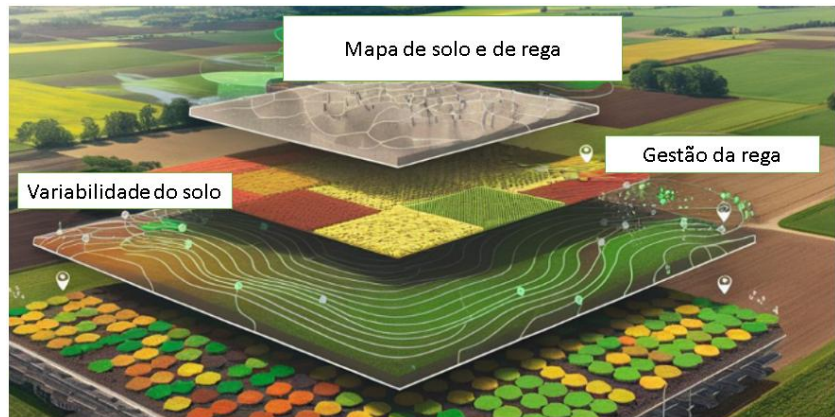


Figura 8 – Exemplo das diferentes camadas de informação que poderão ser incluídas num SIG aplicado à agricultura. Adaptado de EcoTechnic

Com base nos dados organizados em ambiente SIG, abre-se a oportunidade para melhorar a gestão dos recursos naturais e implementar trabalhos e projetos em diferentes áreas, que podem ir desde a análise de risco e controlo ambiental até à avaliação da potencialidade produtiva.

Todorovic e Steduto (2003) criaram um SIG para apoio à gestão da rega, mas dirigido a gestores de associações de regantes e governantes de instituições locais. Foram combinadas diversas camadas de informação do ponto de vista administrativo, pedológico, climatológico, topográfico e de utilização do solo, fazendo-se uma caracterização agroecológica da região em estudo (Todorovic et al., 1998; Steduto e Todorovic, 2001). As autoridades regionais forneceram bases de dados sobre a potencialidade agrícola em determinadas áreas. O SIG permitiu estabelecer as condições do solo e clima, identificar as áreas aptas para certas culturas e estimar as necessidades de rega. Com esta ferramenta, foi possível realizar estudos em diferentes escalas, desde municípios até regiões.

O SIG, sendo uma ferramenta multifuncional, permite também analisar informação sobre a qualidade da água para avaliação da salinidade. Métodos de interpolação espacial ajudam a produzir mapas para análise da salinidade subterrânea (Kanagaraj & Elango, 2016; Garbanzo et al., 2025; Liu et al., 2025).

Faraslis et al., (2024), desenvolveram um SIG para a delimitação de zonas agrícolas sustentáveis em Thessaly, Grécia, para definir a limitação de água. Aplicaram uma análise de séries temporais com técnicas geoinformáticas, fazendo um zonamento agroclimático, seguindo os seguintes processos: a) caracterização do microclima da região, usando índices de aridez e saúde da vegetação; b) caracterização do relevo e dos tipos de solo; c) definição de zonas adequadas para agricultura sustentável. Devido às alterações climáticas, os resultados indicam que regiões áridas e semiáridas apresentam precipitação insuficiente para sustentar culturas anuais de sequeiro.

Segundo Kim et al. (2021), a monitorização agrícola, a previsão sazonal das culturas e o planeamento da adaptação às alterações climáticas exigem a identificação de onde, quando, como e quais as culturas que são cultivadas. Os conjuntos de dados sobre sistemas de cultivo, a nível global, oferecem informações úteis para a tomada de decisão. Por exemplo a FAO disponibiliza uma base de dados sobre as necessidades ecológicas das culturas (ECOCROP) (FAO, 2000). No entanto, não só as principais fontes de informação (satélites, sensores, ensaios e modelos) disponibilizam esses dados, como também as resoluções espaciais e temporais dos mesmos variam significativamente, devido a diferentes requisitos dos utilizadores. Desta forma o SIG é utilizado normalmente como uma ferramenta integradora de dados com diferentes origens e resoluções espaciais e temporais.

Uniyal et al. (2019), avaliaram o desempenho do modelo agrohidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para simular o fluxo de água, evapotranspiração e necessidades de rega em quatro bacias hidrográficas de diferentes zonas agroclimáticas. Os resultados demonstraram que a estimativa da quantidade de água aplicada foi superior quando a gestão da rega se baseou na disponibilidade hídrica do solo. Esta abordagem procura manter os níveis de humidade dentro de uma faixa considerada ótima para o desenvolvimento das plantas, antecipando a reposição de água antes da ocorrência de défices hídricos significativos. Por outro lado, a estratégia baseada no stress fisiológico da planta resultou numa menor dotação de água, uma vez que a rega apenas era acionada quando os sinais de carência hídrica se tornavam evidentes na cultura. Importa salientar que os cenários de programação da rega simulados revelaram ser possível alcançar uma poupança significativa de água sem comprometer de forma expressiva o rendimento da cultura em estudo. Assim, a adoção de critérios de rega baseados na resposta fisiológica das plantas evidencia-se como uma estratégia promissora em contextos de escassez hídrica, favorecendo uma utilização mais eficiente dos recursos hídricos com impacto reduzido na produtividade agrícola. Em regiões com disponibilidade limitada de água, como no Mediterrâneo,

o problema reside na quantificação da água aplicada na agricultura e na avaliação dos seus impactos sociais quando se instalam sistemas de rega.

3. Material e Métodos

3.1. Área de Estudo

A área de estudo foi o Aproveitamento Hidroagrícola de Cela (AHC), localizado no Paúl da Cela, na Várzea da Nazaré (Figura 9). Trata-se da antiga lagoa de Pederneira, que ficou assoreada a partir do século XVIII, sendo atualmente uma zona de intensa atividade agrícola. É uma área rebaixada, preenchida por sedimentos arenosos. Situa-se no Vale de Famalicão, abrangendo parte do rio Alcoaça e as baixas aluvionares da bacia limitada pelas serras da Pescaria e Bário, na freguesia de Famalicão, concelho de Alcoaça, distrito de Leiria (Caroça, 2012). As infraestruturas são geridas pela Associação dos Beneficiários de Cela, que mantém as suas

operações e a monitorização da água que entra e sai no perímetro de rega. Existem açudes que permitem a captação de água do rio Alcoaça através de um bocal — uma secção retangular equipada com uma comporta automática —, utilizada na ausência de bombagem (Caroça, 2012). A área deste aproveitamento é de

454 hectares, cujas coordenadas geográficas que se situam entre as latitudes 38,94° N e 38,97° N, e as longitudes -8,25° E e -8,28° E

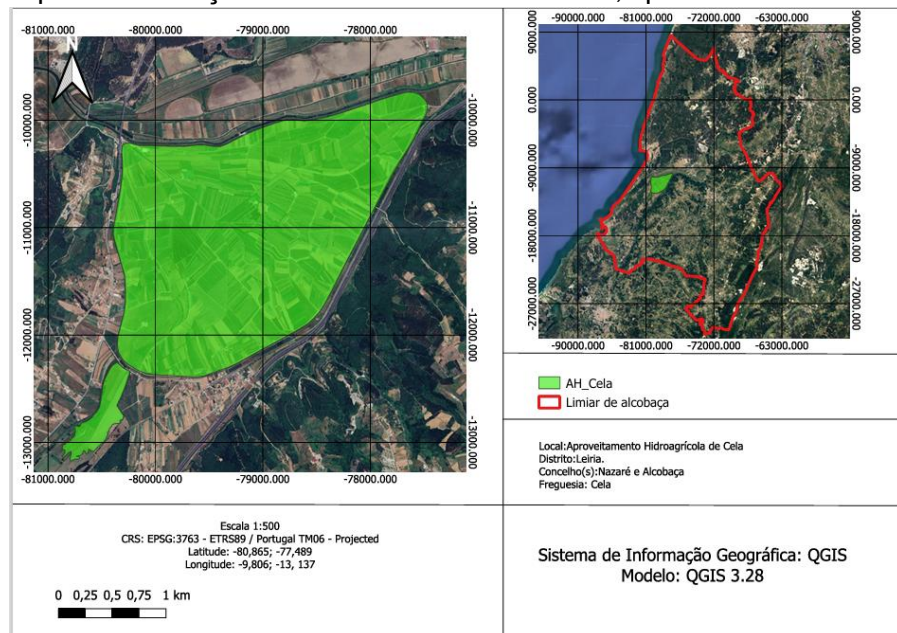


Figura 9 - Apresentação do AHC, onde se situa, as suas coordenadas e o sistema de informação geográfica que foi usado (<https://sir.dgadr.gov.pt/>)

3.2. Fontes de Dados

Foram adquiridos dados para caracterizar o AHC, permitindo assim realizar o zonamento agroclimático. Entre estes dados incluem-se informações sobre os solos, o clima, as culturas presentes e a profundidade das águas subterrâneas. Conforme detalhado nas seções seguintes

3.2.1. Carta de solos

A tomada de decisão exige um conhecimento pormenorizado sobre o solo, nomeadamente das suas propriedades em diferentes profundidades e áreas geográficas, para garantir uma gestão eficaz, incluindo também a gestão das bacias hidrográficas (Ramos et al., 2017). A informação sobre os solos no AHC foi obtida através da plataforma INFOSOLO¹, que disponibiliza uma base de dados observacionais composta por informação relativa às características de vários perfis de solos portugueses. Esta base de dados indica as coordenadas geográficas onde foram recolhidas as amostras de solo, sendo que a capacidade de campo e o coeficiente de emurchecimento foram os parâmetros utilizados no SIG.

Optou-se por utilizar dados situados o mais próximo possível do AHC, como se pode observar na Figura 10.

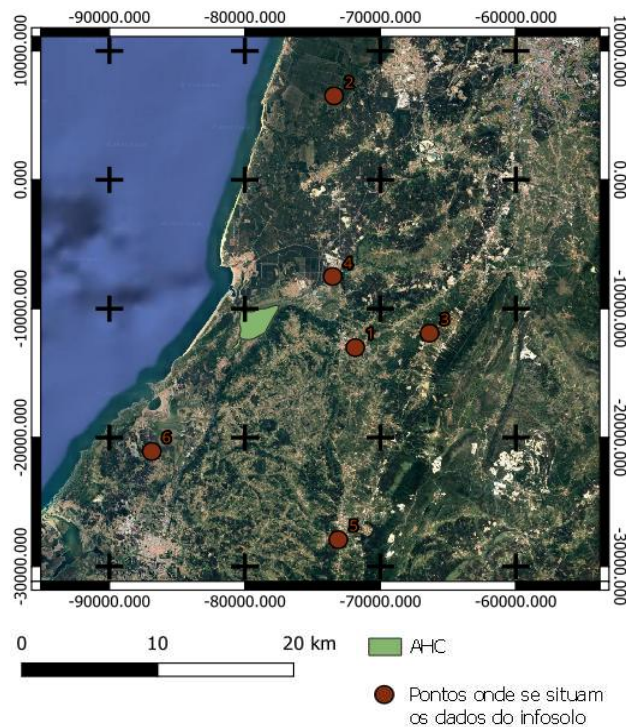


Figura 10 - Localização dos perfis do solo descritos na plataforma INFOSOLO próximos do Aproveitamento Hidroagrícola de Cela.

1 - <https://projects.inia.pt/infosolo/>

Os dados utilizados para a criação do SIG referem-se à área do AHC, abrangendo os concelhos da Nazaré e de Alcobaça.

Em termos de características dos perfis de solo disponíveis, estes são apresentados no quadro seguinte (Quadro 3)

Quadro 3– Informação sobre os dados dos perfis do solo disponibilizado pelo Infosolo para a região do aproveitamento, hidroagrícola de Cela

ID	Longitude	Latitude	Altitude	Ano	Classificação do solo	θ_{FC}	θ_{WP}	Instituto
1	-8,9686	39,54811	36	2002	-	0,2723	0,1274	Estação Agronómica Nacional
2	-8,989	39,72382	87	2010	C4	0,0574	0,014	Instituto Superior de Agronomia
3	-8,90495	39,55862	141	2009	A	0,341	0,2321	Joint Research Centre
4	-8,98857	39,59762	13	2009	A	0,0805	0,0199	Joint Research Centre
5	-8,98154	39,41382	201	2009	A	0,2373	0,1298	Joint Research Centre
6	-9,1433	39,47415	5	2009	A	0,0676	0,0192	Joint Research Centre

A água disponível total ou reserva utilizável (RU, mm) foi determinada utilizando a metodologia FAO56 (Allen et al., 1998) como segue:

$$RU = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (1)$$

onde θ_{FC} o teor de água à capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$), θ_{WP} teor de água ao coeficiente de emurchecimento ($m^3 m^{-3}$) e Z_r a profundidade máxima da raiz (m).

3.2.2. Profundidade da água subterrânea

Para a profundidade da água subterrânea, recorreram-se a dados do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH¹) o qual é gerido pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA²). Optou-se por utilizar dados provenientes de poços situados na área envolvente do AHC, nos concelhos de Alcobaça e Nazaré. Foram elaborados gráficos dos valores médios mensais para observar a variação da profundidade do lençol freático ao longo do ano. Na Figura 11 apresenta-se o mapa com a localização dos poços utilizados para o zonamento. Com base nestes gráficos, selecionaram-se os poços que apresentam o padrão ilustrado na Figura 12.

1 - <https://snirh.apambiente.pt/index.php?%3E>

2 - <https://apambiente.pt/>

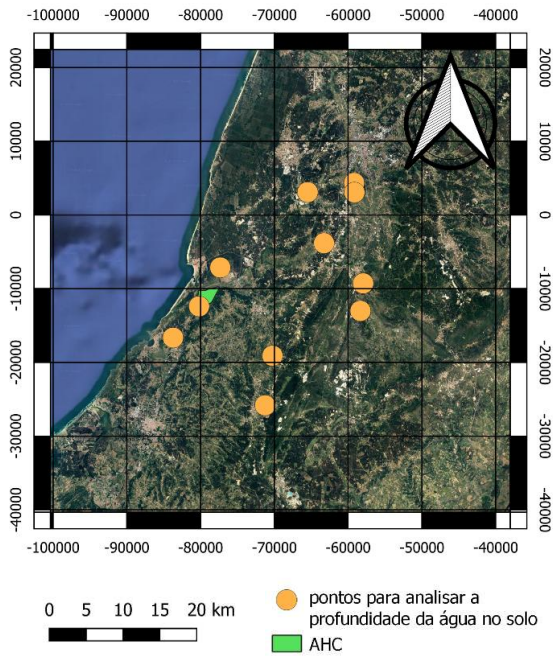


Figura 11 - Mapa com os poços com dados sobre a profundidade da água no aquífero

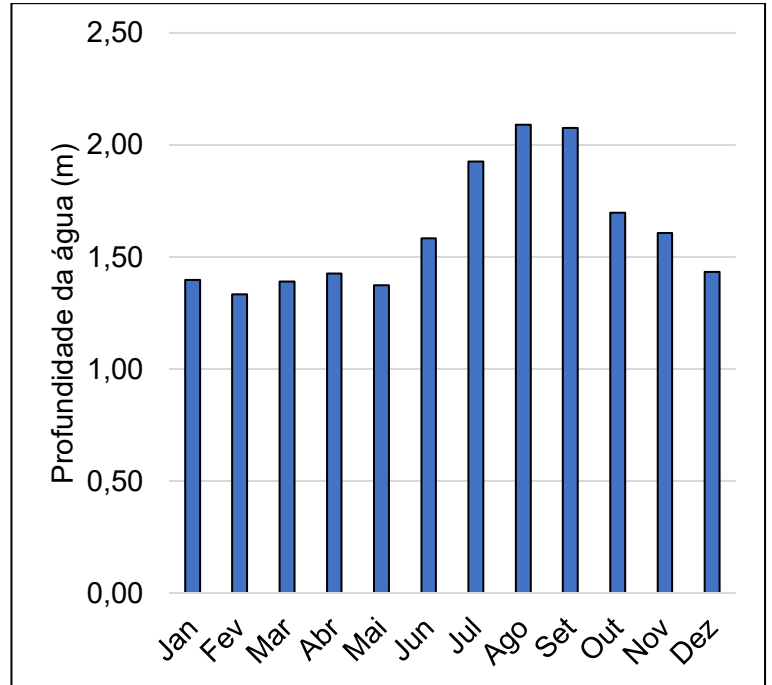


Figura 12 - Exemplo de um gráfico com valores médios mensais de profundidade da toalha freática para o Aproveitamento Hidroagrícola de Cella.

3.2.2. Mapa das Culturas

A ocupação cultural dos solos foi obtida a partir do Sistema de Identificação Parcelar (Figura 13), disponibilizado pelo Instituto de Financiamento da Agricultura e Pescas (IFAP¹), o que permitiu identificar as culturas cultivadas e a área ocupada por cada uma. Complementou-se esta informação com dados do Sistema de Informação do Regadio (SIR²), para delimitar as culturas localizadas exclusivamente no AHC

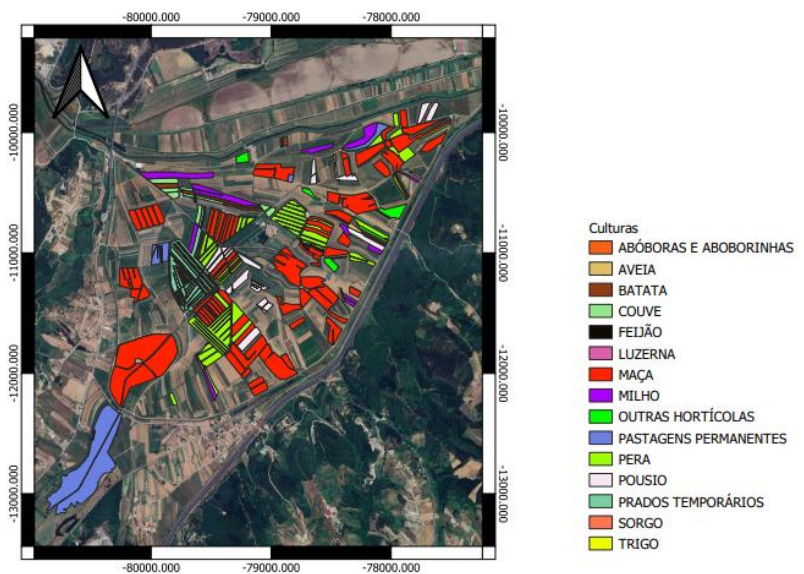


Figura 13- Mapa de culturas existentes no Aproveitamento Hidroagrícola de Cella e a sua classificação (Fonte: IFAP, 2023)

1- <https://www.ifap.pt/portal/>
 2- <https://sir.dgadr.gov.pt/pt/>

Para a presente dissertação, utilizou-se a carta de ocupação cultural do IFAP, obtida através do Sistema de Identificação Parcelar (ISIP¹). Esta carta pretende delimitar as áreas e classificar as parcelas agrícolas, permitindo destacar a cultura predominante no AHC em estudo (Figura 13). Analisando a Fig. 13, consegue-se compreender a diversidade de culturas existentes no AHC. Verifica-se que os pomares, em particular os de maçã e de pêra, predominam ocupando 115,94 ha (61% da área). Seguem-se as pastagens permanentes, prados permanentes e pousios, que, em conjunto, ocupam 48,65 ha (26%), as culturas arvenses (trigo, milho, aveia, sorgo e luzerna) com 13,39 ha (7,09%) e, por último, as culturas hortícolas (couve, batata, abóboras, abobrinhas e outras), que ocupam 11,21 ha (6%).

As culturas selecionadas para a realização do zonamento agroclimático foram a maçã (*Malus domestica*), a pêra (*Pyrus communis*), a couve (*Brassica oleracea*) e a batata (*Solanum tuberosum*) (Figura 14). A couve e a batata representam 2,14% e 1,68% do AHC, respetivamente.

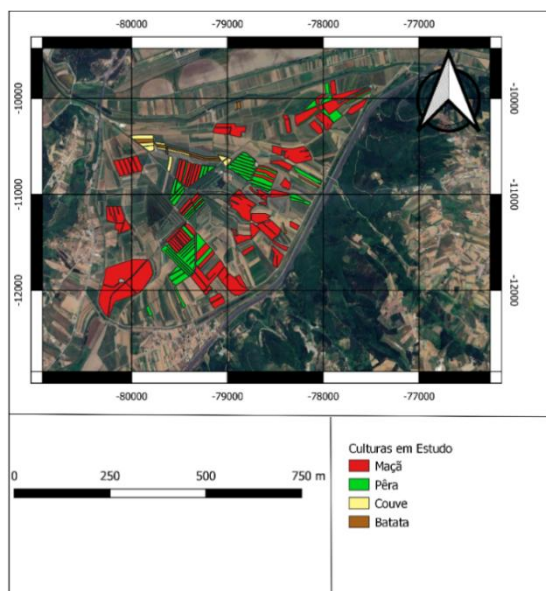
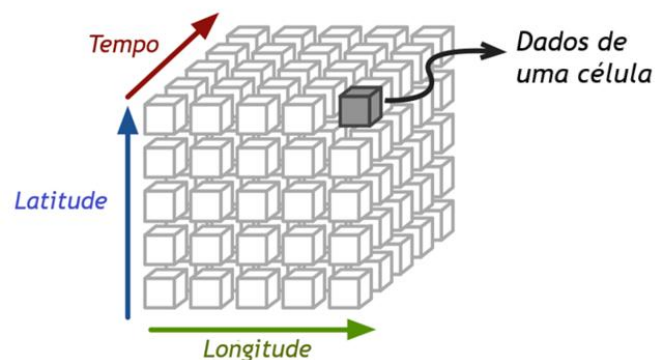


Figura 14 - Mapa das parcelas com as culturas selecionadas para o zonamento agroclimático do AHC

3.2.3. Dados meteorológicos observados e de reanálise

Selecionaram-se seis estações meteorológicas próximas do AHC; as estações meteorológicas de São Pedro de Moel e Fruticultura Vieira Natividade geridas pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA¹), as estações meteorológicas da Cela, Aljubarrota e Alfeizerão da responsabilidade do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) e a estação da Cela gerida pelo Centro Operativo e Tecnológico Hortofrutícola Nacional (COTHN²). Uma vez que existem duas estações na Cela de modo a distingui-las optou-se por denominar a estação incluindo, também, a designação da entidade que a gere. No Anexo 1 são apresentados mais detalhes sobre os dados meteorológicos disponibilizados. As estações de Aljubarrota e Alfeizerão apresentam apenas dados de precipitação enquanto as restantes disponibilizam os dados diários de temperatura máxima e mínima, radiação solar, humidade relativa, velocidade média do vento, bem como a precipitação. Para o presente estudo, utilizaram-se também um conjunto de dados meteorológicos de reanálise produzidos e disponibilizados pelo Centro Europeu para as Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECWRF), designado por AgERA5³ (Brown et al., 2023). Este conjunto de dados de reanálise disponibiliza dados diários, espacializados com uma resolução de 10 km x 10 km, orientados para aplicações no setor agrícola. Permite realizar análises relacionadas com a produção agrícola, nomeadamente através de variáveis como a temperatura, a precipitação e a humidade relativa. Para a aquisição dos dados do AgERA5, foi necessário aceder e manipular ficheiros no formato NetCDF (Figura 15). Segundo Rew et al. (1996), o NetCDF (*Network Common Data Form*) é uma interface que disponibiliza uma biblioteca de funções para acesso a dados, permitindo o seu armazenamento e recuperação sob a forma de matrizes. Trata-se de um formato eficaz para armazenar dados multidimensionais, sendo amplamente utilizado no arquivo de séries temporais distribuídas espacialmente.



Os ficheiros NetCDF são estruturados com base em três dimensões principais: latitude, longitude e tempo. Os dados são armazenados em células que são coordenadas por estas dimensões, como representado na Figura 15. Cada célula pode conter valores correspondentes a diferentes variáveis meteorológicas.

Figura 15 - Representação esquemática de um NetCDF

1 – <https://www.ipma.pt/pt/otempo/prev.localidade.hora/>

2 – <https://www.cothn.pt/>

3 – <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/sis-agrometeorological-indicators?tab=overview>

Foram adquiridos dados relativos às variáveis meteorológicas necessárias para o desenvolvimento da presente dissertação, restringindo-se as coordenadas (latitude e longitude) ao enquadramento espacial das estações meteorológicas selecionadas, com o objetivo de permitir a comparação entre dados observados (Obs) e de reanálise (Rean). A extração dos dados foi feita com a plataforma Spyder¹, convertendo os ficheiros NetCDF para o formato .csv, de modo a apresentar as variáveis meteorológicas escolhidas em formato de coluna com um passo de tempo diário, para o período desde 1979 até ao presente, numa determinada latitude e longitude (ponto da grelha AgERA5).

Após a preparação dos dados, foram selecionados os pontos da grelha de reanálise mais próximos das estações meteorológicas, para proceder à comparação entre os dados observados e os dados de reanálise, conforme ilustrado na Figura 16. Importa referir que determinados dados de reanálise são apresentados em unidades distintas das necessárias ao cálculo da evapotranspiração de referência pelo método PM-ET_o, nomeadamente: a temperatura quando expressas em Kelvin, e a radiação solar, foi fornecida em J/m².

Os dados de temperatura, estando em Kelvin, foram convertidos para graus celsius.

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.16 \quad (2)$$

onde K é a temperatura expressa em kelvin e °C graus celsius.

Como a velocidade do vento é medida a diferentes alturas, para converter para a altura standard usada na FAO-PM, que é de 2 m, a seguinte aproximação foi usada:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z - 5.42)} \quad (3)$$

onde u_2 é a velocidade do vento a 2 metros de altitude, u_z é a velocidade do vento numa determinada altura, sendo o z a altura da medição.

Por fim, a radiação solar, tinha como unidade o joule, converteu-se para megajoule.

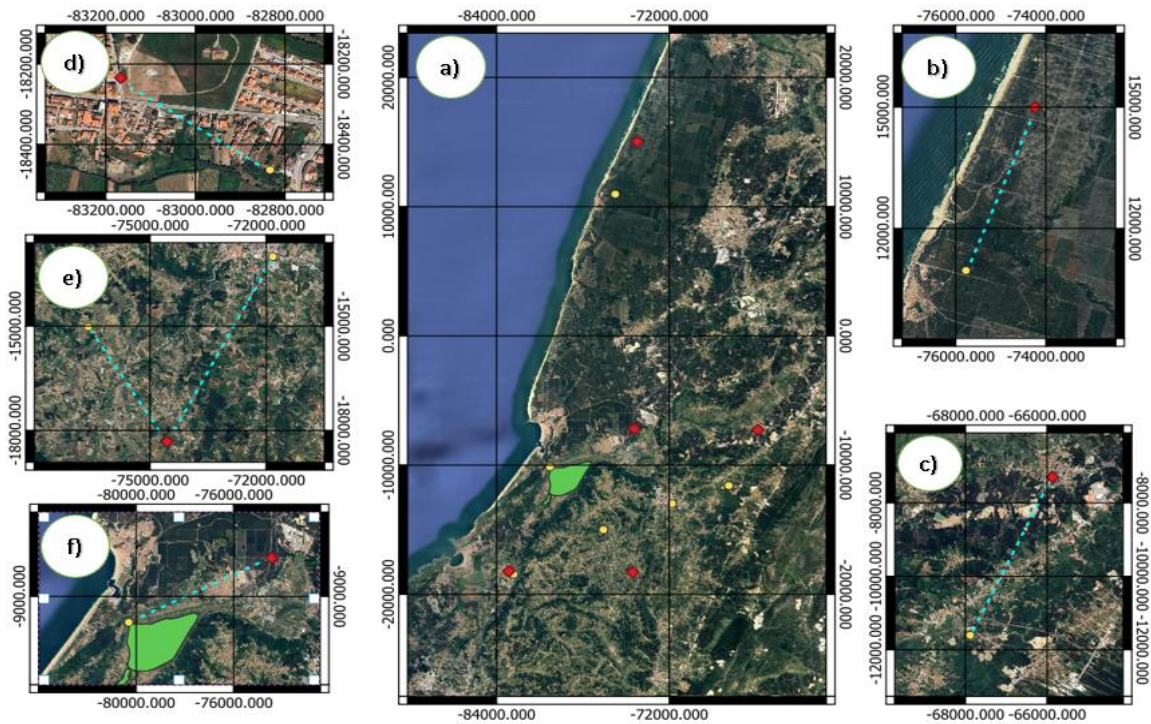


Figura 16 - a) Apresentação das estações meteorológicas (●) com o ponto mais próximo da grelha de reanálise (◆) sendo essas: b) São Pedro Mel, c) Aljubarrota, d) Alfeizerão, e) Fruticultura Vieira Natividade e Cela - COTHN e f) Cela - SNIRH

3.3. Avaliação da qualidade e correção dos dados meteorológicos

As estações meteorológicas podem ser utilizadas em estudos relacionados com a agricultura, através do registo de diversas variáveis meteorológicas, nomeadamente: temperatura máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) do ar, radiação solar (R_s), humidade relativa (HR) e velocidade do vento (u_z). No entanto, os registos efetuados por estas estações podem apresentar falhas na aquisição de dados, resultantes de diversos fatores, como: mau funcionamento dos equipamentos, envelhecimento dos sensores, má calibração, desalinhamento, sujidade ou problemas no sistema de registo (Allen, 2008). Estes problemas podem comprometer a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método ET_o -PM. Assim, a avaliação da qualidade (Quality Assessment – QA) e o controlo de qualidade (Quality Control – QC) dos dados são procedimentos fundamentais para garantir uma maior precisão na estimativa da ET_o (Allen, 2008).

A diferença entre QA e QC reside no momento e no tipo de atuação. O QC está relacionado com o funcionamento da estação meteorológica, incluindo a localização dos sensores, o tipo de equipamento, os procedimentos de calibração e os ajustamentos aplicados aos dados após a recolha. Já a QA está mais centrada na análise dos dados recolhidos, visando a sua validação e identificação de anomalias.

No âmbito da presente dissertação, foi dada ênfase à QA das variáveis meteorológicas necessárias para o cálculo da PM-ET_o, uma vez que não estavam disponíveis os meios para realizar o QC.

Para a realização da QA, foram criados gráficos que permitem uma avaliação visual dos dados e a detecção de eventuais falhas ou incoerências (Allen, 1996; Allen, 2008). De modo geral, estes gráficos foram analisados com base nos registos das variáveis meteorológicas ao longo do tempo.

No caso da radiação solar (R_s), foi também considerada a radiação solar em céu limpo (R_{so}), calculada de acordo com a seguinte expressão (Allen; 2008):

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z)R_a \quad (4)$$

onde R_{so} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é a radiação solar em condições de céu limpo e R_a ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) a radiação no topo da atmosfera (extraterrestrial radiation), z é a altitude do local (m).

A R_{so} permite estabelecer um limite superior, possibilitando a avaliação da proximidade entre esta e os dados de R_s observados (Equação 6). É importante ter em consideração que o cálculo da R_{so} é uma estimativa teórica, baseada em modelos físicos, e não uma medição direta.

Ao comparar a R_{so} com os registos da radiação solar observada, espera-se que os valores estejam o mais próximo possível, em particular nos meses de verão nos quais é expectável a ocorrência de céu totalmente limpo. Quando essa proximidade não se verifica, os dados observados serão ajustados de forma a aproximarem-se dos valores estimados por R_{so} , seguindo a metodologia proposta por Allen (1996; 2008).

Para além desta correção, foram elaborados outros tipos de gráficos com o objetivo de garantir a consistência e qualidade dos dados meteorológicos. Esses gráficos incluem a representação de séries temporais de valores médios mensais das variáveis determinantes para o cálculo da PM-ET_o, ou acumulados no caso da precipitação.

Adicionalmente, foi realizado um estudo exploratório preliminar, através da construção de diagramas de extremos e quartis, com o intuito de identificar e excluir valores atípicos presentes no conjunto de dados, conforme sugerido por Costa et al. (2022). A remoção destes valores atípicos visa evitar distorções nos indicadores estatísticos utilizados na avaliação e na posterior correção dos dados provenientes da reanálise meteorológica.

3.4. Avaliação e correção dos dados de reanálise

A avaliação realizada entre os dados meteorológicos observados (Obs) e os de reanálise (Rean) incidiu sobre as variáveis utilizadas para o cálculo da PM-ET_o, após a aplicação da análise de qualidade (QA), bem como sobre a precipitação acumulada em intervalos trimestrais.

Para a comparação entre os conjuntos de dados, foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de regressão ou constante de proporcionalidade (b_0), raiz (quadrada) do erro médio quadrático (RMSE) e sua forma normalizada (NRMSE), eficiência de modelação (EF) e percentagem de viés (PBIAS). Estes indicadores, utilizados para a avaliação da qualidade dos dados, encontram-se detalhados em Martins et al. (2017).

A análise incluiu também a construção de equações de regressão linear simples, com os valores da Rean como variáveis independentes e os valores Obs como variáveis dependentes, de forma a ajustar funções do tipo afim ($y = bx + a$). O declive (b) e a ordenada na origem (a) dessas retas foram determinados com base nas fórmulas descritas em Martins et al. (2017):

$$b = \frac{Cov_{ORean}}{s_O^2} \quad (5) \quad a = \overline{Rean} - b\bar{O} \quad (6)$$

onde b é o declive, Cov_{ORean} é a covariância, sendo O os dados Obs e $Rean$ os dados de reanálise e s_O^2 a variância dos dados Obs, a é a ordenada de origem, \overline{Rean} é a média da reanálise, b o declive e \bar{O} a média de Obs.

As Equações 5 e 6 foram utilizadas para compreender o comportamento das observações em relação a uma dada reta, com o objetivo de avaliar eventuais sobrestimações ou subestimações associadas aos dados da grelha. Seguiu-se, para tal, a metodologia proposta por Martins et al. (2017). A ausência de sobrestimação ou subestimação corresponde à situação ideal em que $b = 1$ e $a = 0$. Quando $b > 1$, verifica-se uma sobrestimação dos dados de reanálise face aos observados; inversamente, $b < 1$ indica uma subestimação. No caso da interceção na origem, $a > 0$ corresponde a uma tendência de sobrestimação, enquanto $a < 0$ indica subestimação.

Para além dos indicadores estatísticos anteriormente referidos, foi também utilizada a reta de regressão forçada à origem (FTO), conforme descrito por Eisenhauer (2003), cuja equação é dada por $y = b_0x$. Este modelo assume uma relação de proporcionalidade direta entre os valores de reanálise e os valores observados, sendo a constante de proporcionalidade b_0 calculada através da seguinte fórmula:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^M O_i \text{Rean}_i}{\sum_{i=1}^M O_i^2} \quad (7)$$

onde b_0 é o e O_i^2 os dados observados ao quadrado.

A constante de proporcionalidade b_0 foi interpretada, neste estudo, como um indicador de viés, considerando-se que $b_0 > 1$ indica uma tendência para a sobrestimação e $b_0 < 1$ para a subestimação dos dados de reanálise em relação aos dados observados.

No que diz respeito à validade do modelo, esta foi avaliada através do coeficiente de determinação (R^2), que mede a proporção da variância dos dados de reanálise explicada pelo modelo. Trata-se de um indicador amplamente utilizado para avaliar a qualidade do ajustamento do modelo, sendo dado pela seguinte expressão:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(\text{Rean}_i - \overline{\text{Rean}})}{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^n (\text{Rean}_i - \overline{\text{Rean}})^2]^{0.5}} \right\}^2 \quad (8)$$

onde R^2 é o Coeficiente de determinação, $\overline{\text{Rean}}_t$ os valores da reanálise ajustados

O coeficiente R^2 varia entre 0 e 1. Quando o valor se aproxima de 1, indica que a regressão entre os dados de Rean e os dados Obs apresenta uma forte correspondência. No entanto, valores elevados de R^2 servem apenas para avaliar se a tendência geral do ajustamento é adequada, não sendo suficientes para uma análise completa da qualidade do modelo (Legates & McCabe, 1999). Assim, é fundamental utilizar outros indicadores para a comparação entre os dados Obs e de Rean.

A raiz (quadrada) do erro médio quadrático (RMSE) mede os desvios entre os valores observados e os simulados, expressando-se nas mesmas unidades das variáveis em análise;

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (O_i - \text{Rean}_i)^2}{M}} \quad (9)$$

onde RMSE é o erro médio quadrático e M o número total de amostras

O RMSE normalizado (NRMSE) (Janssen & Heuberger, 1995), é a razão entre RMSE e a média dos valores observados (O);

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (10)$$

onde NRMSE é o RMSE normalizado.

A percentagem de viés (PBIAS) (Gupta et al., 1999) foi utilizada para medir a tendência média dos valores simulados, ou seja, se os dados de Rean são, em média, superiores ou inferiores aos valores Obs. Este indicador é dado pela seguinte expressão:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^M (Rean_i - O_i)}{\sum_{i=1}^M O_i} \times 100\% = \frac{\overline{Rean} - \bar{O}}{\bar{O}} \times 100\% \quad (11)$$

onde PBIAS é a percentagem do viés

Caso o PBIAS = 0, significa que não há viés na simulação, ou seja, os valores simulados coincidem, em média, com os valores observados. Valores positivos de PBIAS indicam sobrestimação (os valores simulados são, em média, superiores aos observados), enquanto valores negativos indicam subestimação (os valores simulados são, em média, inferiores aos observados).

A eficiência de modelo (EF) (Nash & Sutcliffe, 1970), é dada por:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (O_i - Rean_i)^2}{\sum_{i=1}^M (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

onde EF é a eficiência do modelo

Valores de EF (Eficiência de Modelação) próximos de 1 indicam que os dados de reanálise refletem de forma adequada os dados observados (Legates & McCabe, 1999).

Os indicadores referidos foram aplicados às seguintes variáveis: temperatura máxima e mínima, humidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e precipitação acumulada trimestral e anual.

No caso de se verificar que mais do que uma das variáveis necessária ao cálculo da ET_o (Seção 3.5) necessitava de correção de viés optou-se por não fazer a sua correção individual dada a interligação entre as mesmas. Assim, a correção foi efetuada para a T_{max} e T_{min} as quais são input dos indicadores bioclimáticos (Seção 3.6) e para a ET_o . A correção dos dados de precipitação foi

também efetuada usando o valor acumulado mensal para a correção do mês correspondente. Para a temperatura foi usada uma correção calculada pela seguinte fórmula (Paredes et al, 2018):

$$c(t) = \overline{Rean} - \bar{O} \quad (13)$$

Onde $c(t)$ é o valor aditivo para a correção do viés, para o mês t .

Após determinar o valor aditivo, é adicionado aos valores diários dos dados $Rean$.

3.5. Estimação da evapotranspiração da cultura de referência

A evapotranspiração de uma cultura é a soma da transpiração das plantas com a evaporação da água no solo. Pode ser estimada, com base em observações climáticas padrão a partir de modelos específicos de determinadas culturas, nomeadamente recorrendo à aproximação K_c-ET_o como proposta por Allen et al. (1998) e amplamente utilizada. Nesta aproximação a cultura de referência (hipotética) assemelha-se a um relvado extenso, com 0.12 m de altura, bem abastecido de água, em crescimento ativo e com características (albedo e resistência de superfície) que foram definidas e parametrizadas na metodologia FAO56 para a equação de Penman-Monteith (Allen et al. 1998; Pereira et al., 2025). Assim a evapotranspiração da cultura de referência (ET_o , $mm\ d^{-1}$) quando calculada com um passo de tempo diário é obtida como:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (14)$$

onde R_n a radiação líquida à superfície da cultura ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), o G a densidade do fluxo de calor do solo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), γ a constante psicométrica ($kPa\ ^\circ C^{-1}$), o T a média da temperatura do ar a 2 metros de altura ($^\circ C$), $(e_s - e_a)$ o déficit da pressão de vapor medido a 2 metros de altura, Δ o declive da curva de pressão a vapor ($kPa\ ^\circ C^{-1}$), 900 o coeficiente para a cultura de referência ($kL^{-1}\ kgK$) resultante da conversão de segundos para dias e de coeficientes de desvios à substituição das variáveis ρ , c_p e r_a como dado em 0,34 o coeficiente do vento para a cultura de referência ($kL^{-1}\ kg\ K$), resultante da razão r_s/r_a e 0,408 o valor para $1/\lambda$ com $\lambda = 2,45\ MJ\ kg^{-1}$. (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2025).

3.6. Indicadores bioclimáticos selecionados para o zonamento

Os indicadores bioclimáticos foram calculados usando os dados dos pontos da grelha da AgERA5, incluídos no AHC como apresentado na Figura 17.

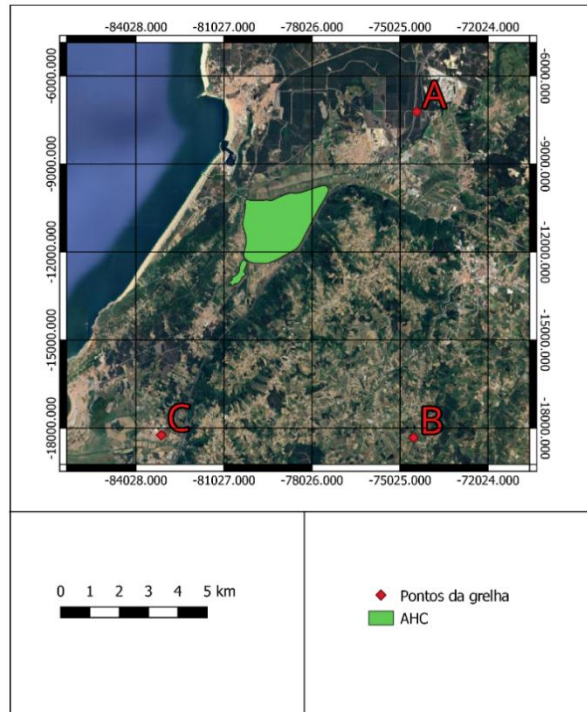


Figura 17 - Pontos da grelha AgERA5 considerados para o cálculo dos indicadores bioclimáticos

Para este estudo, foram considerados os seguintes indicadores: índice ombrotérmico; número de dias com stress térmico; acumulação térmica ou graus dias tendo em consideração a cultura em estudo; índice de aridez; precipitação acumulada e número de horas de frio acumulados.

Estes indicadores foram determinados para o ponto central do AHC realizando-se a sua interpolação espacial através da média ponderada do inverso do quadrado da distância (IDW). A determinação do ponto central da área de estudo, neste caso o AHC, foi realizada através do QGIS. Seguidamente, foi determinado a distância euclidiana pela seguinte fórmula (Liberti et al, 2014):

$$d_2 = \sqrt{(p_1 - p_2)^2 + (q_1 - q_2)^2} \quad (15)$$

onde p representa a latitude e q a longitude. Os valores p_1 e q_1 correspondem às coordenadas de cada ponto indicado na Figura 17, enquanto p_2 e q_2 referem-se exclusivamente às coordenadas do ponto central do AHC. Definidas as distâncias, calcula-se a média ponderada de IDW, usando a seguinte formula (Rolim et al, 2011):

$$\hat{z} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2} l_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}} \quad (16)$$

Índice ombrotérmico

O índice ombrotérmico reaciona os valores médios mensais da precipitação acumulada (mm) e da temperatura média (°C) usando uma série longa de dados meteorológicos. Para a construção deste gráfico, os eixos da temperatura e da precipitação devem estar coordenados de forma que se verifique a relação $P(\text{mm}) = 2 T(^{\circ}\text{C})$ (Challi, 2021).

Stress Térmico:

Avaliado pelo número de dias com temperaturas acima de um limiar (maior que 30 °C) crítico durante o período maio a agosto, este indicador é relevante para identificar potenciais impactos negativos sobre a qualidade e rendimento das culturas (Schlenker & Roberts, 2009; Lizaso et al., 2018; Webber et al., 2018; Zhu et al., 2023; Gouveia et al., 2019).

Acumulação térmica ou graus dias

Calculada pela soma dos graus-dia em que a temperatura média diária ultrapassa a temperatura base (T_b) específica para cada cultura. Esta variável é fundamental para estimar o progresso fenológico e o ritmo de desenvolvimento vegetativo. Para a maçã e a pêra, foram consideradas temperaturas base de 3,5 °C e 0 °C (Sousa et al, 2022), respetivamente, com acumulação térmica calculada no período de fevereiro a abril. Para a batata e couve, as temperaturas base consideradas foram 2 °C e 4,5 °C, respetivamente, com períodos definidos de dezembro a julho para a batata e março a setembro para a couve. A acumulação térmica foi calculada para os períodos críticos de crescimento de cada cultura. As T_{upper} que foram usadas para a presente estudo foram 30 °C e 35 °C.

A escolha das temperaturas foi realizada com base em valores apresentados noutros estudos. Assim, a T_{base} de 2 °C foi escolhida para a cultura da batata (Abreu, 2022; Pereira et al., 2025). Para as restantes culturas foi adotado o valor de 4,5 °C que é a média das temperaturas usadas para outros estudos, sendo entre 5 °C (Kalisz, 2011; Sim et al., 2021; Vitasse et al., 2018; Warrington et al., 1999) e 4 °C (Hofstra & Hesketh, 1969). Os GDD foram calculados através da seguinte expressão (Arnold, 1959).

$$GDD = \begin{cases} 0, & T_{med} < T_{base} \\ T_{med} - T_{base}, & T_{base} < T_{med} < T_{upper} \\ T_{upper} - T_{base}, & T_{med} \geq T_{upper} \end{cases} \quad (17)$$

onde T_{med} é a temperatura média diária resultante do valor médio entre a T_{max} e T_{min} T_{base} é a temperatura de base ou limite inferior de temperatura para a acumulação térmica e T_{upper} é o limite superior acima do qual não ocorre acumulação térmica.

Índice de aridez

A determinação do índice de aridez foi realizada com base em dados anuais de precipitação e evapotranspiração potencial. Para o cálculo da evapotranspiração potencial (PET, mm) foi utilizado a aproximação de Thornthwaite (1948):

$$PET_{mensal} = 16(10 T_{mean}/I_{anual})^a \quad (18)$$

onde PET_{mensal} é a evapotranspiração potencial, T_{mean} a temperatura média, I o índice térmico anual e a o expoente da evapotranspiração.

O índice térmico anual corresponde ao somatório do índice térmico mensal, que é calculado segundo a seguinte expressão.

$$I_{mensal} = (0.2T_{mean})^{1.514} \quad (19)$$

onde I_{mensal} é o índice térmico mensal.

Após calcular o índice térmico anual, procede-se ao cálculo do expoente da evapotranspiração anual.

$$a = (6.75 \times 10^{-7} I_{anual}^3) - (7.71 \times 10^{-5} I_{anual}^2) + (1.7912 \times 10^{-2} I_{anual}) + 0.49239 \quad (20)$$

onde I_{anual} é o Índice térmico anual

Por fim, calcula-se o rácio entre a média anual da precipitação e a evapotranspiração potencial.

$$AI = \frac{P}{ETP} \quad (21)$$

onde P é a precipitação anual e ETP é a evapotranspiração potencial.

Os valores do índice e respetiva classificação foram apresentados na secção 2.2.2.

Número de horas de frio

Foi determinado o número de horas de frio, que pretende contabilizar o número de horas com temperatura igual ou inferior a um determinado valor durante o período de repouso vegetativo (Melgarejo & Salazar, 2000). Geralmente, culturas como os pomares de folha caduca necessitam de um período de repouso vegetativo com temperaturas abaixo dos 7 °C. Estas temperaturas devem coincidir com o período em que a planta se encontra em repouso vegetativo, para assegurar um bom desabrolhar e frutificação (Feio, 1991). Assim, considerou-se que a acumulação de horas de frio se iniciava no mês Outubro e terminava no final do mês de fevereiro.

Para determinar o número de horas de frio, é necessário definir o período durante o qual se conta esse número de horas. Para o presente estudo, foi usado o método Corssa-Rainaud, dado pela seguinte expressão (Melgarejo & Salazar, 2000):

$$hf = k \left(24 \frac{7 - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right) \quad (22)$$

onde hf é horas de frio e k um valor constante

O valor k foi fixado em 1,5, em função das condições climáticas da região estudada (Sánchez-Capuchino, 1967).

4. Resultados e discussão

4.1. Avaliação da qualidade dos dados meteorológicos observados

A avaliação da qualidade dos dados meteorológicos foi realizada para as seguintes variáveis: temperatura do ar, a humidade relativa, a radiação solar e a velocidade do vento, como descrito detalhadamente nas próximas seções.

4.1.1. Temperatura

A avaliação da temperatura foi realizada através de uma análise visual, de forma a garantir que não existam falhas de valores, e verificar que a temperatura máxima nunca seja inferior à temperatura mínima (Figura 18).

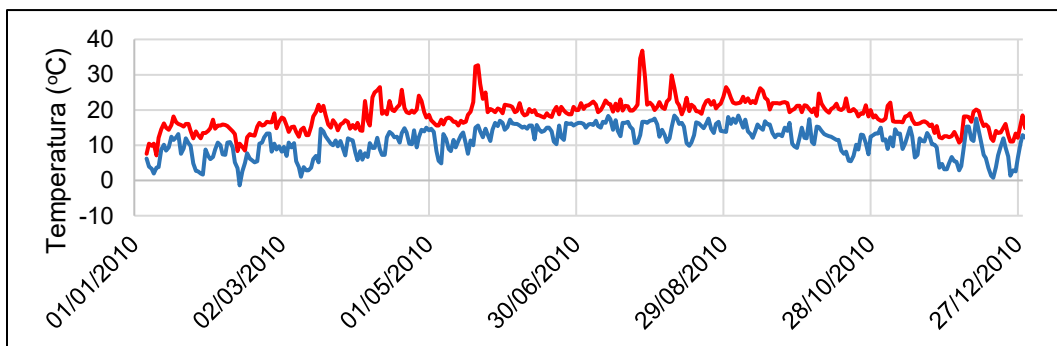


Figura 18 - Avaliação das temperaturas máxima (—) e a mínima (—) adquiridas na estação de São Pedro de Moel no ano de 2010

Na figura 18 observou-se que a temperatura máxima não se situa abaixo da mínima. Porém, certos períodos de um dado ano, não contém dados diários completos como é no caso apresentado na Figura 19.

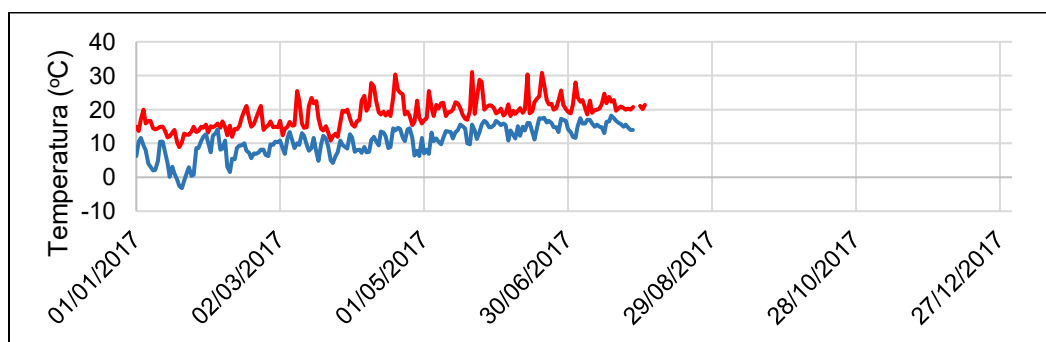


Figura 19 - Avaliação das temperaturas máxima (—) e a mínima (—) adquiridas na estação de São Pedro de Moel no ano de 2017

Para além desta análise visual, compararam-se os valores médios, máximos e mínimos das estações meteorológicas com a normal climatológica (1971-2000 e 1981-2010) da estação de Fruticultura de Vieira Natividade e com a normal climatológica (1971-2000) da estação de São Pedro de Moel conforme se pode observar nas Figuras 20 e 21.

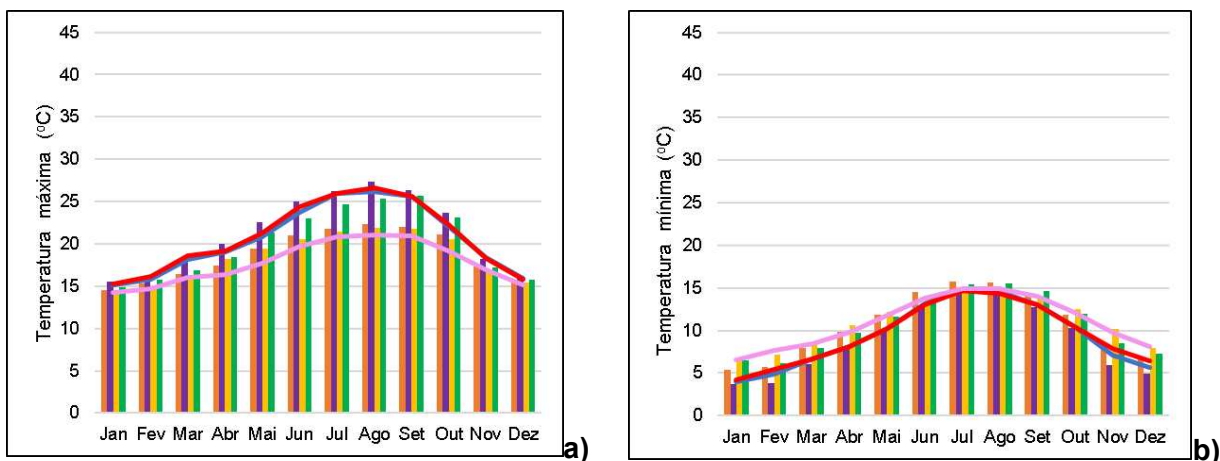


Figura 20 - Média mensal da temperatura máxima (a) e da mínima do ar (b) por mês relativos às estações meteorológicas de Cella -do SNIRH (2001 – 2023) (■), Fruticultura de Vieira da Natividade (1999 – 2023) (■), São Pedro de Moel (2019 – 2023) (■), Cella do COTHN (2011 – 2024) (■). Normal climatológica da estação meteorológica da Fruticultura de Vieira Natividade relativa ao período 1981-2010 (—) e ao 1971-2000 de (—) e da estação meteorológica de São Pedro de Moel (—) relativa ao período 1971-2000.

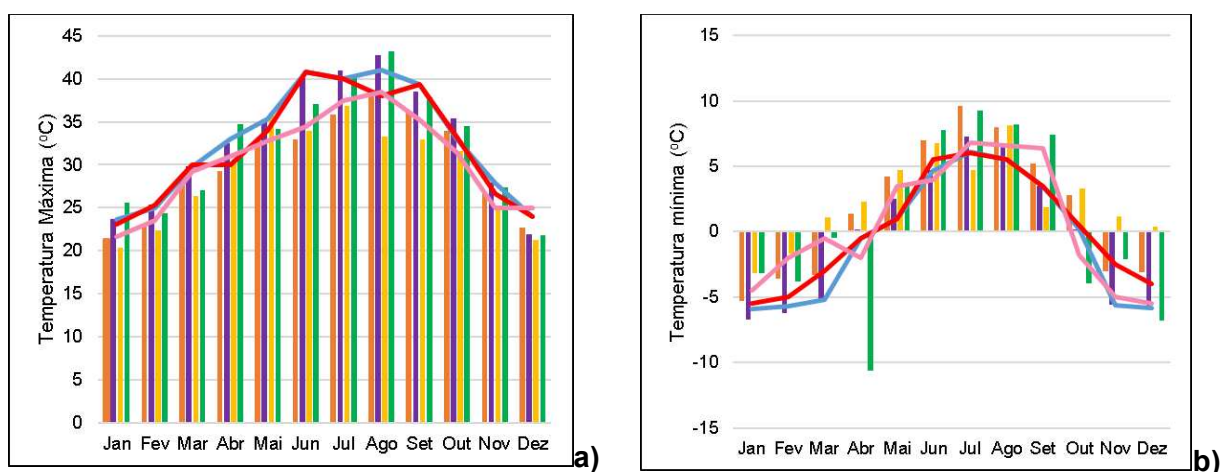


Figura 21 - Temperatura máxima absoluta e mínima absoluta por mês relativos às estações meteorológicas de Cella -do SNIRH (2001 – 2023) (■), Fruticultura de Vieira da Natividade (1999 – 2023) (■), São Pedro de Moel (2019 – 2023) (■), Cella do COTHN (2011 – 2024) (■). Normal climatológica da estação meteorológica da Fruticultura de Vieira da Natividade relativa ao período 1981-2010 (—) e ao 1971-2000 de (—) e da estação meteorológica de São Pedro de Moel (—) relativa ao período 1971-2000.

As Figuras 20 e 21 apresentam uma concordância razoável com as normais climatológicas das estações próximas, embora se verifiquem alguns valores dispares. Na Figura 20, observa-se que, nos valores médios da temperatura máxima e mínima, os registos das estações meteorológicas estão próximos da normal climatológica. Já na Figura 21, existe uma variação considerável, sendo de destacar o valor registado no mês de abril, em que a temperatura mínima extrema da estação de Cella-COTHN onde se registaram valores de -10 °C. Uma vez que os dados de temperatura da estação meteorológica Cella-COTHN apresentam um comportamento muito

diferente das outras que a circundam e considerando que não existe muito relevo na região esta estação foi excluída do conjunto utilizado para a comparação com os dados de reanálise.

4.1.2. Humidade

As estações que continham dados de humidade relativa máxima (HR_{max}) e mínima (HR_{min}), necessários para elaborar os gráficos segundo o método proposto por Allen (2008) para avaliação da sua qualidade, foram as estações de Cela – COTHN e Cela – SNIRH (Figura 22).

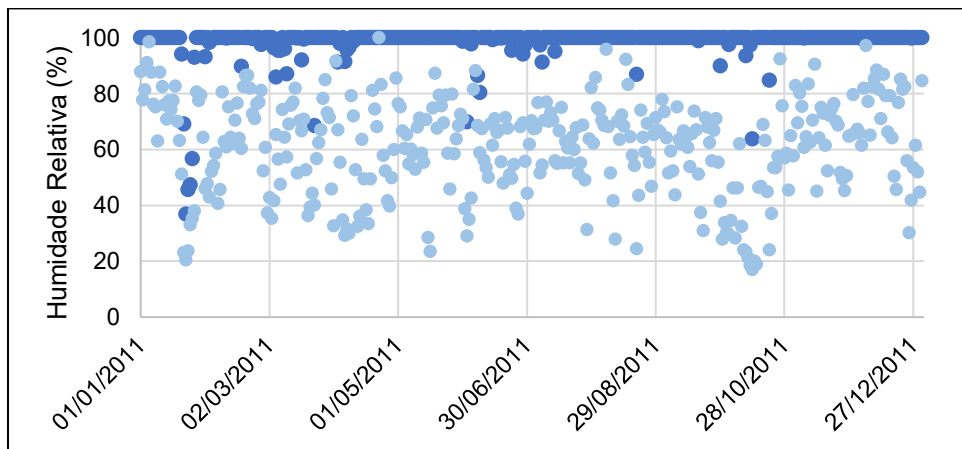


Figura 22 – Exemplo de dados diários de humidade relativa máxima (●) e mínima (●) da estação de Cela do COTHN no ano de 2011

Na estação Cela-COTHN, a série de dados de HR_{min} mostrou um registo deficiente dos dados de HR_{min} , uma vez que não se verifica uma variação consistente com a estação do ano (resultados não apresentados). Valores mais baixos de HR_{min} são expectáveis nos meses da primavera e verão, e mais elevados no outono e inverno. Foram identificadas anomalias nos valores de HR_{max} os quais devem estar próximos de 100% quando a estação meteorológica se encontra em condições standard (sobre um relvado extenso, bem regado e em pleno crescimento) com alguns anos a apresentarem valores fora do normal ($HR_{max} > 100\%$) e outros em que os valores de HR_{max} estão mais próximos do valor inferior aconselhado (80%). Segundo Allen (2008) valores de HR_{max} superiores a 100% devem-se a uma má calibração dos sensores.

Para as restantes estações, apenas foram disponibilizados valores de humidade relativa média diária (HR_{med}), o que permitiu comparar os dados entre as diferentes estações meteorológicas através de um gráfico de extremos e quartis (Figura 23).

Na Figura 23, verifica-se que não existe uma grande diferença na amplitude da variabilidade dos dados entre as diferentes estações. No entanto, e como esperado, 75% dos dados da estação de Cela – SNIRH situam-se acima dos 80% de humidade relativa, com o terceiro quartil a ultrapassar os 90%. Nas restantes estações, o terceiro quartil não atinge esse valor. Verifica-se falta de consistência nos dados de HR_{max} e HR_{min} da estação Cela-COTHN, o que reforçou a decisão de exclusão desta estação.

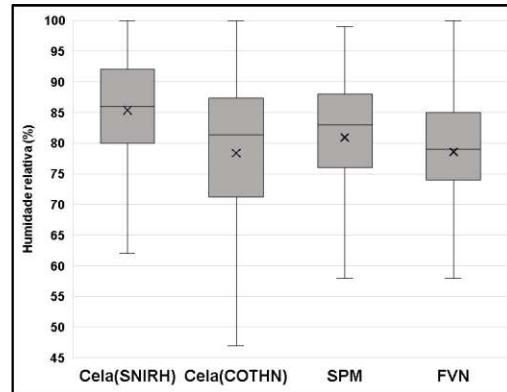


Figura 23 – Gráfico de extremos e quartis da humidade relativa média por estação meteorológica

4.1.3. Radiação

Na avaliação dos dados de radiação solar (R_s), em certas estações meteorológicas foi possível realizar a correção dos registos, como se observa na Figura 24.

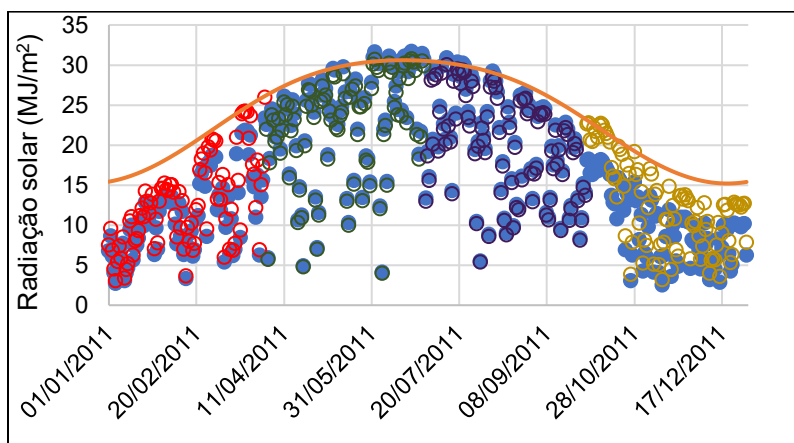


Figura 24 - Gráfico apresentando o R_s (●), relativa à estação de São Pedro de Moel no ano de 2016, a R_{so} (—) determinado pelo modelo da FAO56, com o R_{ajust} , sendo a correção diferente por trimestre: 1º Trimestre (○); 2º Trimestre (○); 3º Trimestre (○) e 4º Trimestre (○)

No entanto, nem todos os dados se encontravam aptos para correção, devido ao seu mau posicionamento em relação à curva teórica R_{so} . Esses dados foram removidos de determinadas estações e anos, dada a falta de qualidade dos mesmos.

Após a elaboração dos gráficos R_{so} vs R_s , verificou-se que a discrepância entre os dados R_s e os valores estimados da R_{so} era, em alguns casos, igual ou superior a 5%. Quando este limiar era ultrapassado, considerou-se que tal se devia a problemas nos sensores, nomeadamente falta de manutenção ou deficiente calibração. Nestes casos, foi aplicado um fator de correção numérico

para ajustar os valores de R_s de forma a aproximá-los dos valores de R_{so} . Esta correção foi realizada por trimestres, ao longo de um determinado ano, conforme ilustrado na Figura 24.

Como se pode observar, determinados dados foram ajustados num dado trimestre (Figura 24), em diferentes anos. Contudo, conforme referido anteriormente, alguns dados não foram passíveis de correção devido à sua fraca qualidade, como foi o caso dos registos provenientes da estação meteorológica de Cela- COTHN, reforçando a decisão da sua exclusão dos estudos que se seguem.

4.1.4. Velocidade do vento

A velocidade do vento é uma variável de difícil avaliação (Allen et al., 1998). Por isso, é importante proceder à inspeção visual dos registos para identificar eventuais discrepâncias. (Figura 25)

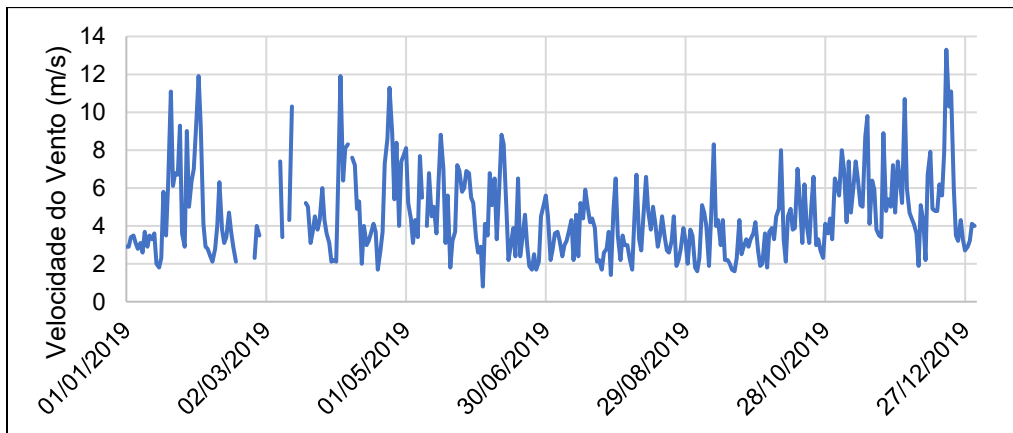


Figura 25 - Velocidade média do vento (—) da estação de São Pedro de Moel no ano de 2019

Foi realizada a comparação dos valores médios mensais da velocidade do vento entre as estações meteorológicas, conforme apresentado na Figura 26. Ao analisá-los, verifica-se que os valores médios mensais da estação SPM são superiores aos das restantes estações. Contudo, é importante ter em conta que a estação SPM apresenta o menor número de dados disponíveis e encontra-se numa área na proximidade do mar.

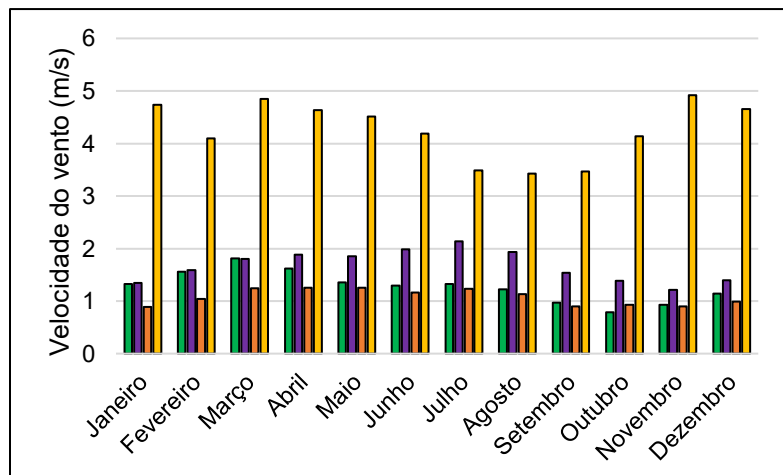


Figura 26 - Médias mensais da velocidade média do vento das estações de Cela do COTHN (■), FVN (■), de Cela do SNIRH (■) e SPM (■)

4.1.5. Precipitação

No que se refere à qualidade dos dados de precipitação, procedeu-se a comparação dos dados observados para as distintas estações meteorológicas; os dados foram acumulados anualmente e trimestralmente. Porém, antes de executá-la, na garantia de uma maior concordância entre os dados em estudo, seguiram-se os seguintes critérios para a seleção dos dados Obs de precipitação acumulada:

1. **Mensal** - Quantificou-se o número de dias com dados em falta por mês num dado ano. Caso um mês apresentasse mais de quatro dias em falta, esse mês é excluído da análise;
2. **Trimestral** - Caso algum trimestre não tivesse os dados completos dos três meses, esse trimestre é excluído;
3. **Anual** - Para os dados anuais de precipitação acumulada, aplicou-se o método do intervalo interquartil (IQR) para identificar e excluir os valores atípicos.

Na Figura 27 apresentam-se os valores anuais acumulados de precipitação observados para as estações meteorológicas de Aljubarrota (1983-2021), Cela-SNIRH (1985-2022), Fruticultura Vieira Natividade (1999-2023) e Alfeizerão (1979-2022).

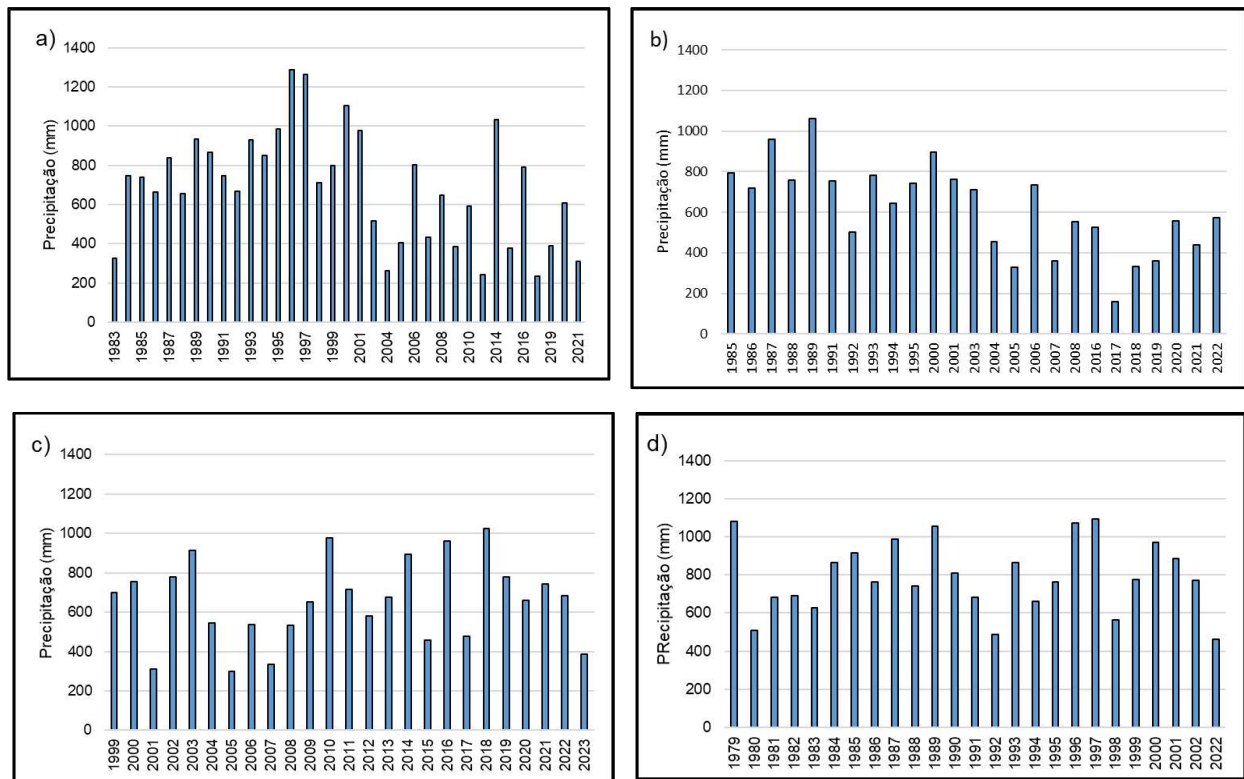


Figura 27 - Precipitação acumulada anual para as estações meteorológicas de (a) Aljubarrota, (b) Cela-SNIRH, (c) Fruticultura Vieira Natividade e (d) Alfeizerão.

Na maioria das estações, os valores médios mensais não atingem os valores da normal climatológica, refletindo a redução da precipitação registada ao longo dos anos (Figura 27). Por fim, são apresentados gráficos com os valores médios anuais da precipitação acumulada (Figura 28).

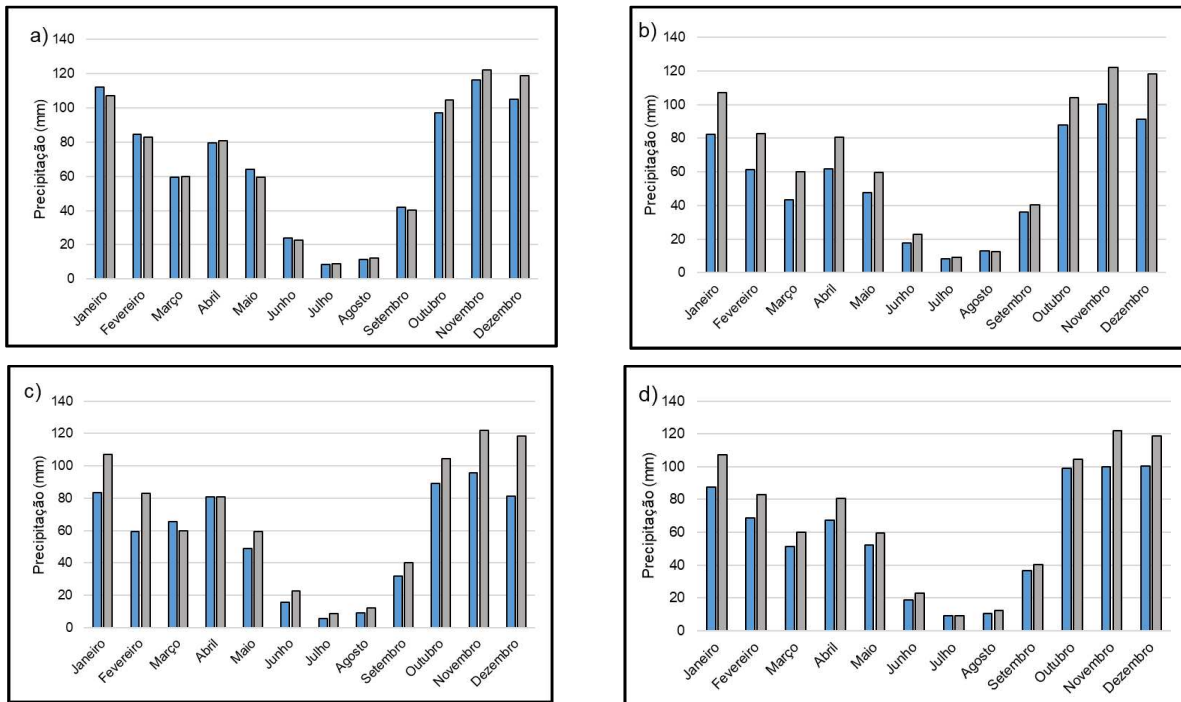


Figura 28 - Comparação de valores médios de precipitação acumulada mensal entre os observados (■) nas estações de (a) Aljubarrota, (b) Cela-SNIRH, (c) Fruticultura Vieira Natividade e (d) e Alfeizerão com a normal climatológica (1981-2010) da estação meteorológica Fruticultura Vieira Natividade (□).

4.1.6. Índice ombrotérmico de Gausson

A Figura 29 , apresenta o índice ombrotérmico de Gausson calculado com os valores médios das normais climatológicas das estações Fruticultura Vieira Natividade (1981-2010 e 1971-2000) e de São Pedro de Moel (1971-2000). Como anteriormente comentado a estação de Cela-COTHN não foi considerada dada a falta de qualidade das suas observações.

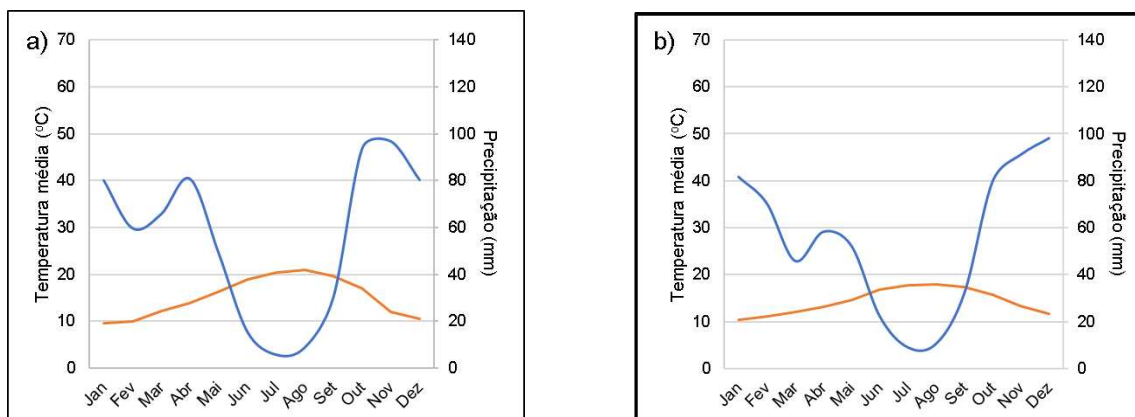


Figura 29 - Índice Ombrotérmico de Gausen calculado com os valores da temperatura média mensal (—) e a precipitação (---) das normais climatológicas por parte de: a) Fruticultura Vieira Natividade de 1971-2000 (—) 1981-2010 e b) São Pedro de Moel de 1971-2000

Foi possível usar este índice para avaliar visualmente os valores médios mensais dos dados tal como descrito em Challi (2021).

Comparando os diagramas ombrotérmicos das normais climatológicas (Figura 30) com os resultantes dos dados observados para os períodos em estudo (Figura 31), foi possível verificar que algumas estações apresentam variações semelhantes às das normais climatológicas. Destacam-se as estações Fruticultura Vieira Natividade (Figura 31a) e Cela- SNIRH (Figura 31b), que exibem resultados mais próximos.

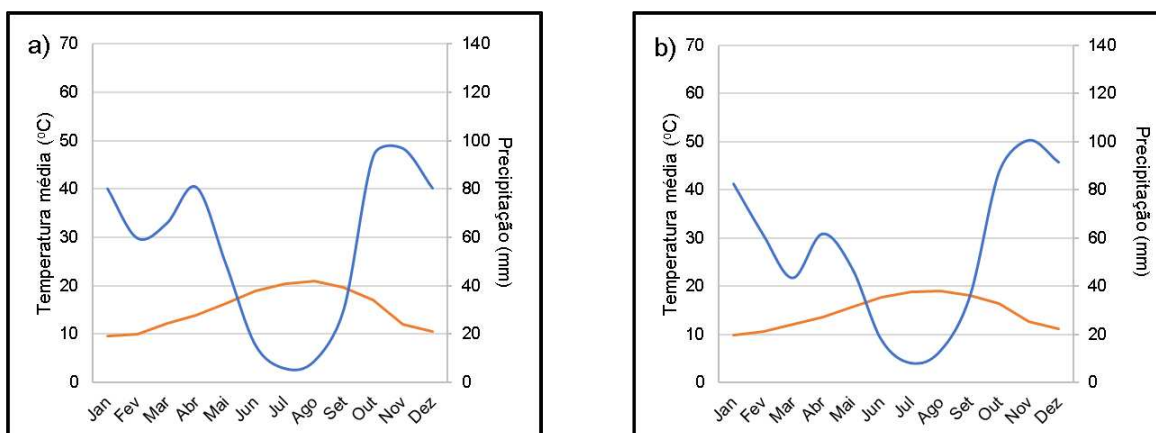


Figura 30 - Índice Ombrotérmico de Gausen das estações meteorológicas de a) Fruticultura de Vieira da Natividade (1999 – 2023), b) Cela – SNIRH (Precipitação:1984 – 2023 e Temperatura média: 2001 – 2023)

Assim, o índice ombrotérmico de Gausen foi utilizado não só para caracterizar o clima, mas também como um instrumento para garantir que os dados de uma dada estação meteorológica apresentam uma distribuição de valores coerente com o clima mediterrânico (Challi, 2021).

Em resumo verifica-se que algumas variáveis apresentaram dados em falta ou incorretamente registados, como é o caso da velocidade do vento, que incluiu valores consistentemente inferiores

a 0,5 m/s (Allen,2008), identificados durante a análise dos diagramas de extremos e quartis. A comparação entre os valores médios e extremos dos dados observados e das normais climatológicas, para as variáveis temperatura e precipitação, permitiu verificar que estes dados não apresentam desvios significativos, conforme ilustrado nas Figuras 20 e 21. No que respeita à precipitação, incluindo os dados de reanálise, verificaram-se desvios anuais relevantes que devem ser tidos em conta, nomeadamente na estação de Cela - SNIRH. Os valores das estações e dos dados de reanálise, em comparação com a normal climatológica de 1971-2000, indicam uma tendência de redução da precipitação ao longo dos anos.

O índice ombrométrico permitiu verificar que os dados de precipitação das estações de São Pedro de Moel e de Cela – COTHN não eram suficientemente fidedignos para realizar a comparação entre os Obs e os dados de Rean pelo que estas duas estações não são usadas na análise que se segue.

Os dados das estações meteorológicas apresentam falhas significativas, nomeadamente na estação Fruticultura Vieira Natividade (FVN), onde a variável humidade relativa e radiação apresentam 25% e 19% de dados em falta, respetivamente. A estação São Pedro de Moel (SPM), que entrou em funcionamento em 2010, regista 60% de falhas nos dados da velocidade do vento.

4.2. Avaliação da qualidade dos dados meteorológicos de reanálise e da necessidade de correção

Uma análise da qualidade dos dados meteorológicos semelhante à efetuada com os dados observados foi realizada para os dados de reanálise. Adicionalmente, foi efetuada a comparação dos valores das distintas variáveis das estações meteorológicas e os valores correspondentes ao ponto mais próximo da grelha da reanálise de modo a avaliar a precisão dos dados e a necessidade de correção dos dados de reanálise.

4.2.1 Temperatura do ar

Para avaliar se os dados de reanálise conseguiam captar as dinâmicas das variáveis, no presente caso da T_{\max} e T_{\min} , foram elaborados os gráficos de extremos e quartis, com o objetivo de comparar os dados observados com os de reanálise (Figura 32). Na Figura 32, observa-se que a amplitude térmica não apresenta uma grande diferença, embora existam discrepâncias em termos de variabilidade entre os dados T_{Obs} e os de T_{Rean} .

Relativamente à T_{\max} , é possível verificar que algumas comparações revelam subestimações ($T_{\max \text{ Obs}} < T_{\max \text{ Rean}}$), com exceção da estação de Cela–SNIRH, onde ocorre uma sobrestimação.

No caso da temperatura mínima, é provável que todas as comparações revelem uma tendência para a sobrestimação por parte da reanálise, uma vez que os dados observados apresentam maior variabilidade e, em alguns casos, situam-se abaixo dos valores da reanálise.

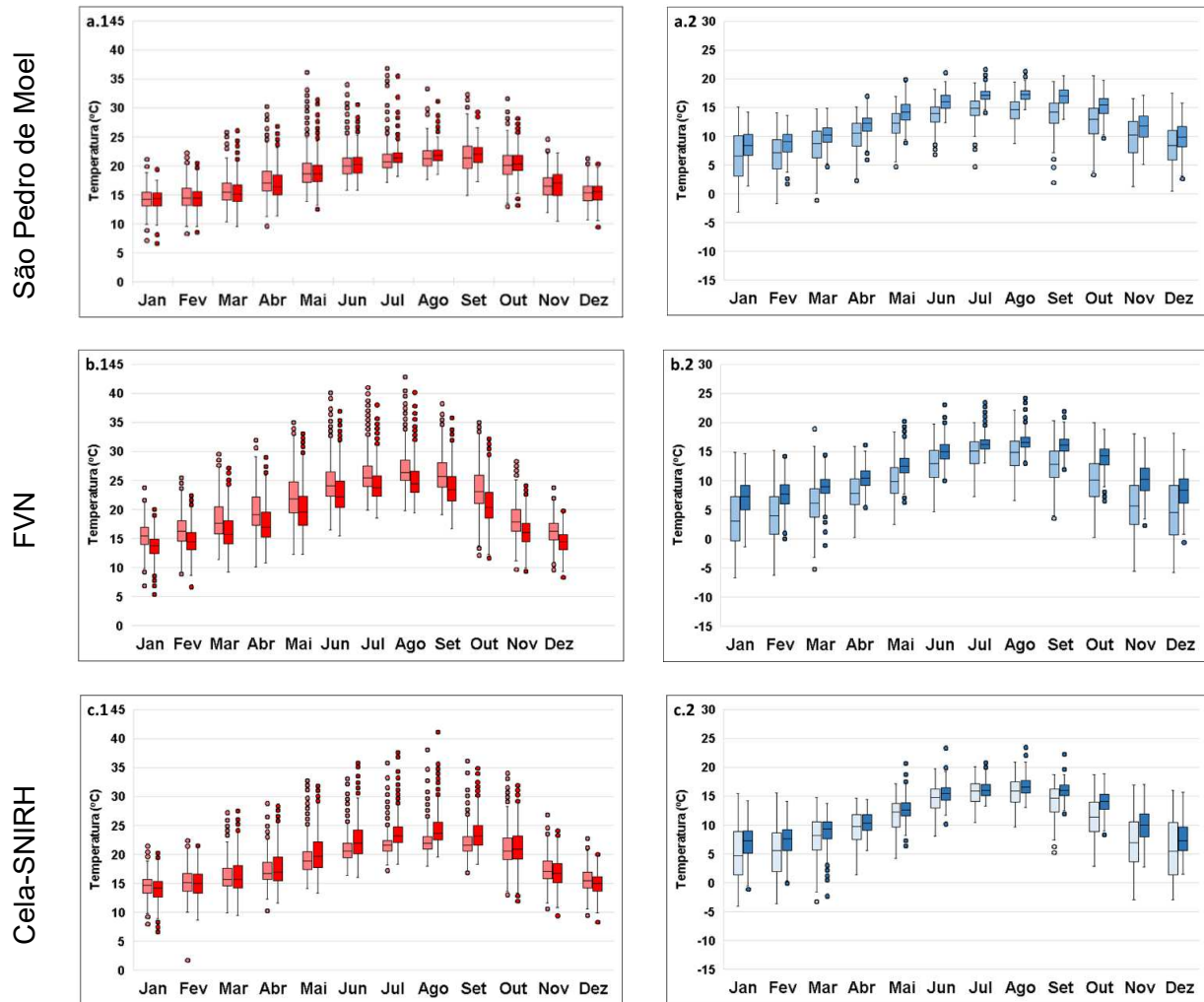


Figura 31 - Comparação entre os dados Obs (■, □) e de Rean (■, □) com a variável temperatura máxima (1) e mínima (2) nas estações: SPM (a); FVN(b); Cela do SNIRH (c)

Os resultados em termos de indicadores de ajustamento para a variável temperatura máxima (T_{max}) e temperatura mínima (T_{min}) são apresentadas respetivamente no Quadro 4.

No que se refere à T_{max} , globalmente, os indicadores apresentam bons resultados com os dados de reanálise. O coeficiente de determinação (R^2) varia entre 0,83 e 0,94. Quanto à eficiência de modelação (EF), os valores são superiores a 0,50, indicando um bom desempenho. Relativamente ao PBIAS, os valores são relativamente baixos, à exceção da estação Fruticultura

Vieira Natividade (FVN), que apresenta 10%. Na comparação entre os dados observados da estação FVN e os de reanálise, pela equação $y=b_0x$, verifica-se que a constante de proporcionalidade b_0 é inferior a 1, com uma subestimação a 10% (Eisenhauer, 2003). Por outro lado, na estação Cela – SNIRH, observa-se uma sobrestimação de cerca de 3%. A reta de regressão foi calculada para cada estação meteorológica, tendo sido seleccionadas como exemplos as estações FVN e Cela – SNIRH (Figura 33).

Quadro 4 -Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de temperatura máxima e mínima observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5).

	SPM		FVN		Cela-SNIRH	
	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}
R^2	0,84	0,75	0,94	0,75	0,83	0,79
a	0,77	4,38	-0,73	6,13	-2,80	4,41
b	0,96	0,80	0,94	0,65	1,18	0,72
b_0	1,00	1,15	0,90	1,15	1,03	1,10
NRMSE (%)	7,5	26,3	11,4	44,5	10,4	25,8
RMSE (°C)	1,35	2,93	2,38	4,02	1,91	2,8
EF	0,82	0,47	0,76	0,43	0,65	0,7
PBIAS (%)	0,3	19,1	-10,00	32,6	2,8	13,51
n=N	3594	3669	8315	8517	5800	6193

SPM-São Pedro de Moel; FVN- Fruticultura Vieira Natividade

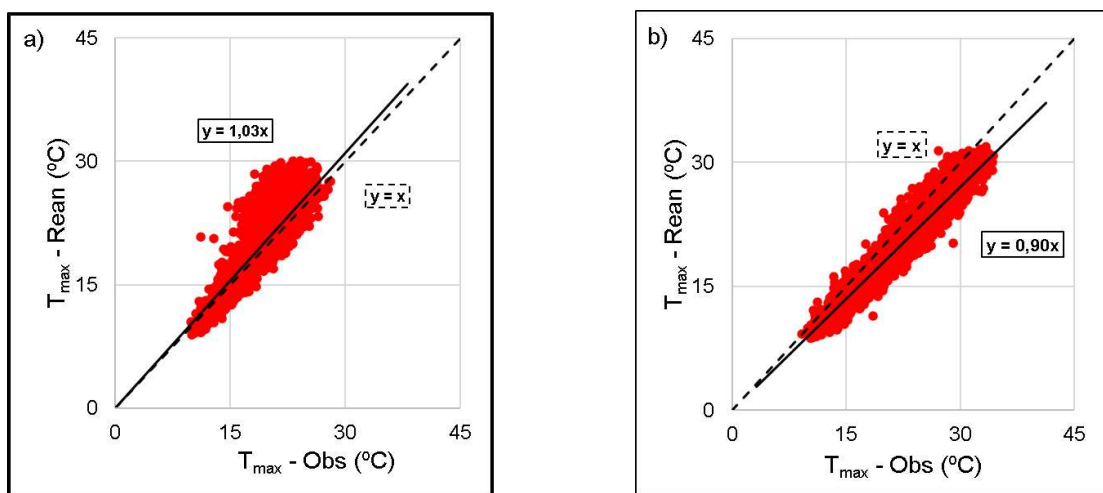


Figura 32 - Regressão linear entre os valores observados da temperatura máxima e os valores de reanálise para o ponto ERA5 mais próximo para as estações a) Cella – SNIRH e b) FVN.

Analisando as retas de regressão da T_{max} , observa-se o comportamento da constante b_0 quando ocorre sobrestimação como é o caso do ponto da reanálise mais próximo da estação meteorológica da Cella-SNIRH (Figura 33a) ou subestimação como no caso do ponto da reanálise

correspondente à estação FVN (Figura 33b). Relativamente à T_{min} , o valor do R^2 é inferior ao observado para a T_{max} , apresenta um PBIAS e o b_0 maior, indicando uma maior sobrestimação. Verifica-se adicionalmente na Figura 32 que os valores médios corroboram os padrões de subestimação e sobrestimação indicados pelos valores de b_0 e PBIAS. Observa-se que existe um maior enviesamento na variável T_{min} em comparação com a T_{max} , o que contribui para valores mais elevados dos erros, i.e., do RMSE e do NRMSE. Assim, foi efetuada a correção dos dados de reanálise usando o método aditivo (Eq. 13).

4.2.2. Humidade relativa do ar

Considerando a variável humidade relativa do ar, procedeu-se à comparação entre os dados HR_{Obs} e os de HR_{Rean} , também através de gráficos de extremos e quartis, conforme ilustrado nas Figuras 25 e 26.

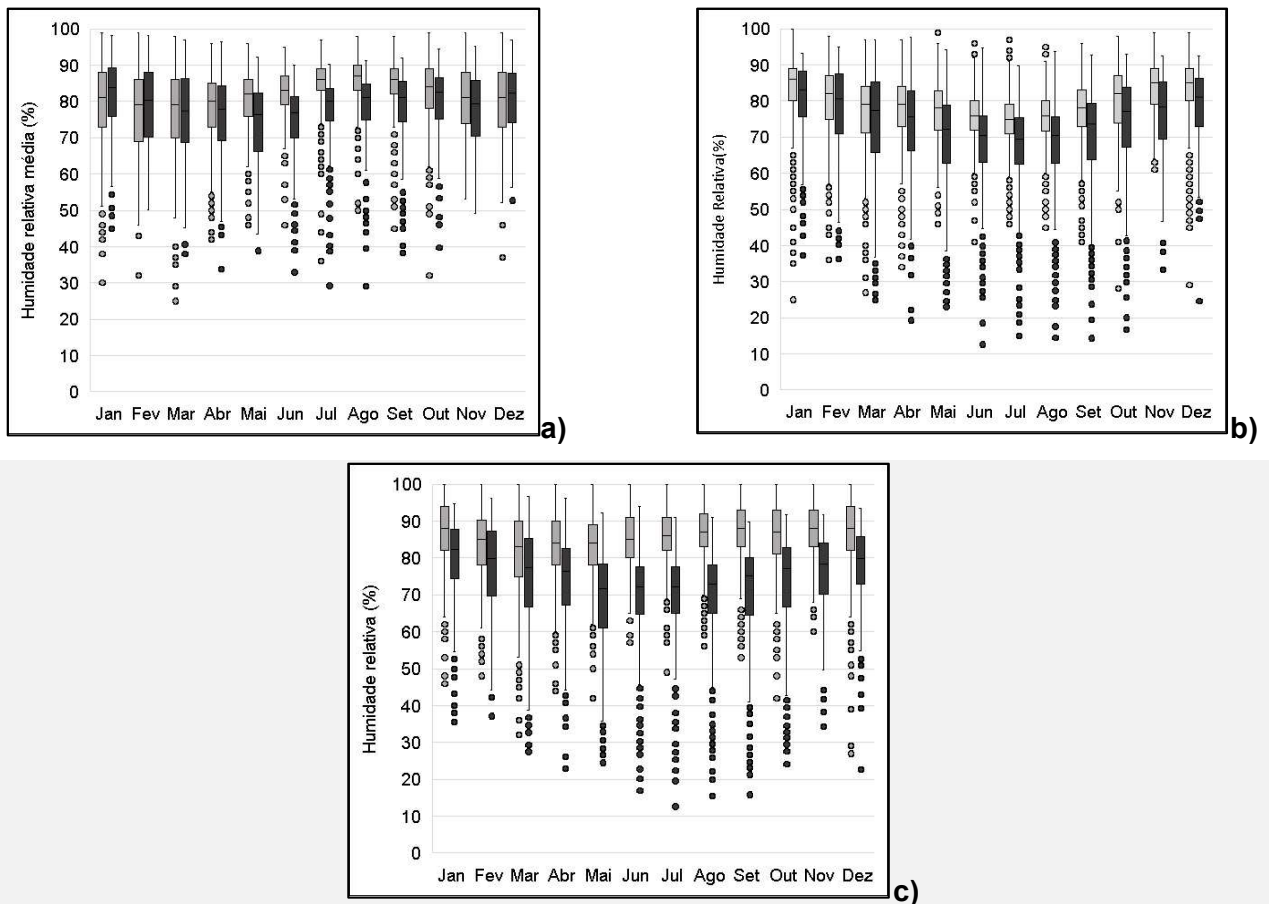


Figura 33 - Comparação de dados médios mensais da humidade relativa entre as estações (□) e de Rean mais próximo (■) das estações (a) SPM e da (b) FVN e (c) Cela-SNIRH

Da análise dos dados, verificou-se que, em determinados meses, existe uma maior variabilidade nos extremos e quartis calculados com base nos dados HR_{Obs} e, noutros casos, nos dados de

HR_{Rean}. Verifica-se também que, na maioria das situações, os dados HR_{Rean} tendem a subestimar os valores em comparação com os dados HR_{Obs}.

Observando os resultados da comparação entre os dados de HR_{Obs} e os de HR_{Rean} apresentados no Quadro 5, verifica-se que o ponto de reanálise mais próximo da estação Cela - SNIRH apresenta indicadores estatísticos que apontam para um desempenho insatisfatório do modelo. O coeficiente de determinação é baixo ($R^2 = 0,17$), indicando fraca capacidade explicativa. Regista-se uma subestimação acentuada ($b_0 = 0,89$; $b = 0,46$; PBIAS = -10,3%) e uma sobrestimação no intercepto ($a = 37,81$). Além disso, o erro é elevado (RMSE = 12,36; NRMSE = 14,4%), refletindo numa baixa eficiência do modelo (EF = -1,64).

Quadro 5 - Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de humidade relativa observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5).

	R^2	b	b_0	a	PBIAS (%)	NRMSE (%)	RMSE (%)	EF	n=N
SPM	0,45	0,7	0,96	21,58	3,7	9,49	7,77	0,18	3849
FVN	0,53	1,04	0,94	8,22	-6,3	11,3	9,04	-0,4	6301
Cela-SNIRH	0,19	0,59	0,87	23,72	-12,9	17,3	14,88	-2,81	6110

SPM-São Pedro de Moel; FVN- Fruticultura Vieira Natividade

Na Figura 33, verifica-se que na estação Cela - SNIRH os valores médios da humidade relativa obtidos pela reanálise são consideravelmente mais baixos do que os valores observados, i.e. elevada, subestima dos valores de HR_{Obs}, refletindo num erro maior. De modo geral, os indicadores estatísticos apontam para erros aceitáveis (NRMSE<20%) mas com boa concordância das dinâmicas da HR ao longo do ano.

4.2.3. Radiação solar

Como no caso dos dados observado procedeu-se igualmente à avaliação dos dados de $R_{s \text{ Rean}}$ usando a R_{s0} , com o objetivo de identificar possíveis erros ou desvios que comprometessem a sua utilização. De forma geral, os dados de $R_{s \text{ Rean}}$ respeitaram os critérios estabelecidos, não sendo necessárias correções adicionais, conforme ilustrado no exemplo da Figura 34.

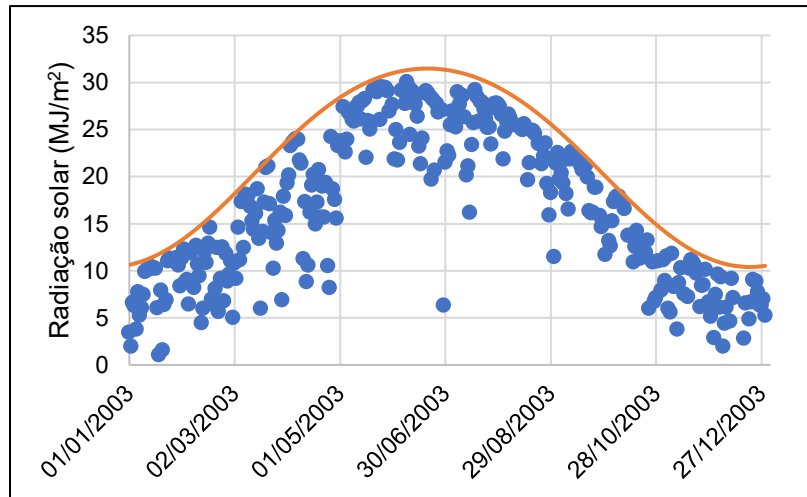
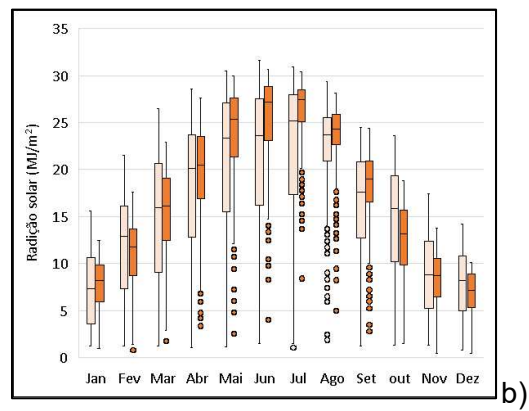
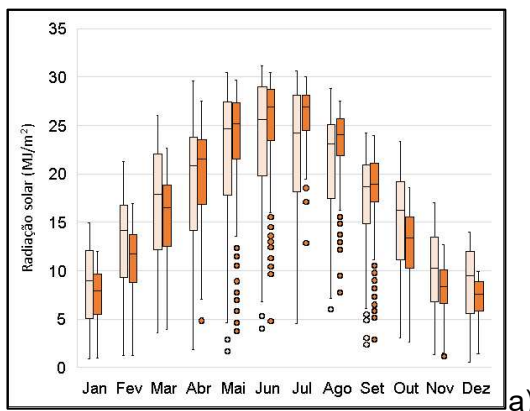


Figura 34 – Exemplo da dinâmica da radiação solar R_s (●), adquiridas do ponto mais próximo da estação meteorológica de Cela do SNIRH no ano de 2003, com R_{so} (—) estimada usando a Equação 6 (Allen et al., 1998)

Em termos de precisão dos dados de reanálise procedeu-se à sua comparação com os dados observados. Para tal foram primeiro elaborados gráficos de extremos e quartis, comparando os dados $R_{s\text{ Obs}}$ com os dados de $R_{s\text{ Rean}}$ do ponto da grelha mais próximo (Figura 36). Verifica-se uma grande amplitude nos dados $R_{s\text{ Obs}}$, sendo a estação meteorológica Fruticultura Vieira da Natividade a que tem uma maior variabilidade, verificando-se a existência de valores mínimos nos meses de primavera e verão inferiores a 5 MJ/m². Foram elaborados gráficos de comparação da $R_{s\text{ Obs}}$ da estação meteorológica FVN, radiação solar em dias de céu limpo (R_{so}) e os dados de $R_{s\text{ Rean}}$ do ponto mais próximo (Figura 37). Na análise da Figura 37, observa-se que um conjunto de dados observados da estação Fruticultura Vieira da Natividade apresenta valores inferiores a 5 MJ/m², o que contribui para uma grande amplitude nos valores registados. Estes valores de R_s podem ser devidos às condições de massas de ar muito húmido típicos na região os quais contribuem para a diminuição da R_s .



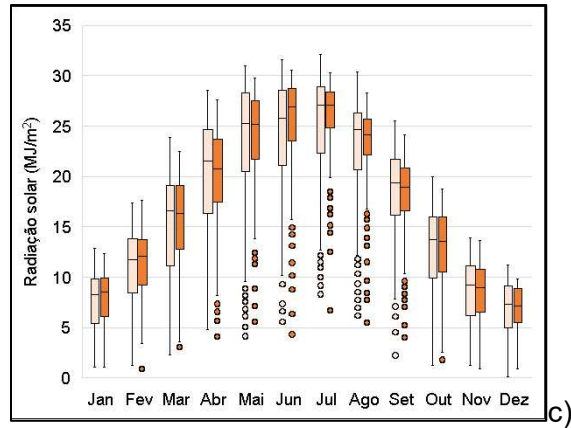


Figura 35 – Gráfico de extremos e quartis relativos aos dados de radiação solar da reanálise ERA5 (■) e observados (□) nas estações meteorológicas de (a) São Pedro de Moel (2010-2023), (b) Fruticultura de Vieira da Natividade (1999-2023) e (c) Cela do SNIRH (1984-2023). ● representam os valores espúrios.

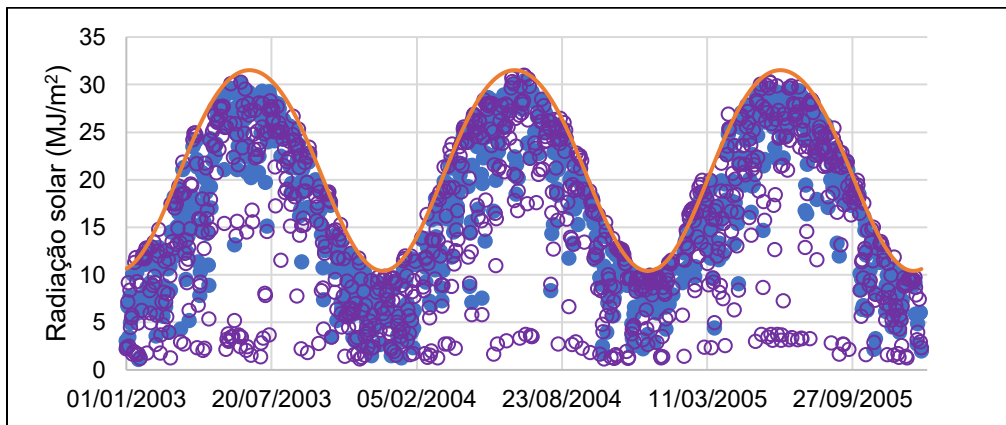


Figura 36 – Comparação dos dados de radiação solar observados na Fruticultura Vieira Natividade (○) e os do ponto mais próximo da grelha da reanálise (●) e a radiação a céu limpo (R_{so}) (—)

Relativamente aos indicadores estatísticos da comparação entre os dados $R_{s\ Obs}$ e os de $R_{s\ Rean}$ da radiação solar estes são apresentados no Quadro 6. Verifica-se que os dados $R_{s\ Rean}$ são próximos dos valores observados nas estações meteorológicas. Não existe tendência para sobre- ou subestima e os erros são inferiores a $4\ MJ\ dia^{-1}$.

Quadro 6 - Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de radiação solar observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5).

	R^2	a	b	b_0	NRMSE (%)	RMSE(MJ/dia)	EF	PBIAS (%)	n=N
SPM	0,76	1,6	0,92	1	23,1	3,93	0,73	1,18	3084
FVN	0,8	2,24	0,88	0,99	22,7	3,64	0,8	1,6	6734
Cela-SNIRH	0,89	1,99	0,9	1	15,9	2,67	0,89	1,7	5422

SPM-São Pedro de Moel; FVN- Fruticultura Vieira Natividade

No entanto quando se analisa o valor normalizado do erro este representa aproximadamente 20% do valor médio da R_{sObs} . A estação que apresenta melhores resultados, de acordo com os indicadores estatísticos considerados, é o ponto da reanálise próximo da estação Cela - SNIRH, com: $R^2 = 0,89$; $NRMSE = 15,9\%$ e $EF = 0,89$. No Anexo 4, apresenta-se gráficos de valores médios mensais da radiação e o desvio padrão. Verifica-se uma boa concordância entre os dados R_{sObs} e os de R_{sRean} , sem indícios de enviesamento. Contudo, na estação de São Pedro de Moel registam-se erros mais elevados, com $RMSE = 3,93 MJ m^{-2} d^{-1}$ e $NRMSE = 23,1 \%$.

4.2.4. Velocidade do vento

Observando a Figura 38, verifica-se que os dados de reanálise ($u_2 Rean$) correspondentes às estações FVN e da Cela-SNIRH apresentam uma tendência para a sobrestima relativamente aos valores $u_2 Obs$. Contudo, na estação SPM, os valores observados e de reanálise são mais próximos, sendo que, neste caso, os dados de $u_2 Rean$ tendem a subestimar a $u_2 Obs$.

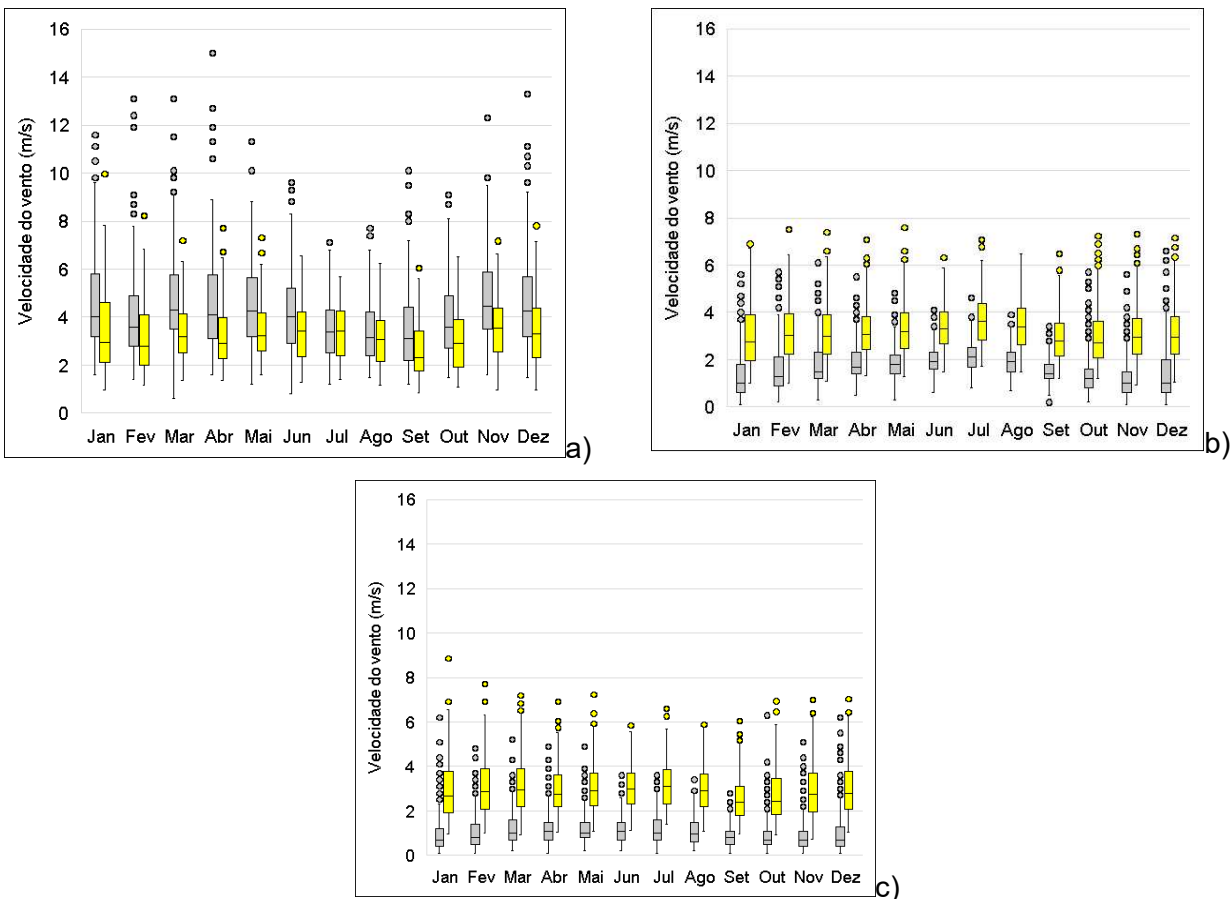


Figura 37 – Comparação da velocidade média entre as estações (□) e de Rean (■), na estação SPM(a), FVN(b) e Cela do SNIRH (c)

Os indicadores estatísticos relativos a esta comparação são apresentados no

^

evidenciando uma grande discrepância entre os dados u_2 Obs e os de u_2 Rean. A análise revela valores excessivamente elevados como no caso do u_2 Rean correspondente às estações de FVN e da Cela – SNIRH nomeadamente às sobre e subestimações. Em contraste, verifica-se que os dados u_2 Rean do ponto mais próximo da estação São Pedro de Moel tendem a subestimar a u_2 Obs, o que se pode relacionar com os valores tendencialmente elevados de u_2 Obs (Figura 35).

No exemplo apresentado na Figura 38, o mau desempenho observado dos dados de u_2 Rean face aos dados u_2 Obs, confirma que não existe uma concordância adequada entre ambos.

Quadro 7 – Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de velocidade do vento observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5).

	R ²	a	b	b ₀	NRMSE	RMSE	EF	PBIAS	n=N
SPM	0,65	0,75	0,6	0,76	31,5	1,27	0,33	-21,6	1878
FVN	0,6	1,3	1,13	1,79	97,7	1,65	-4,86	90	7830
Cela - SNIRH	0,15	2,1	0,79	2,29	176,5	2,09	-15,49	156,7	4956

SPM-São Pedro de Moel; FVN- Fruticultura Vieira Natividade

4.2.5. Evapotranspiração da cultura de referência

Após a avaliação dos dados meteorológicos foi efetuado o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o), tanto para os ET_o Obs como para os dados de ET_o Rean. Para ambos os conjuntos de dados, aplicaram-se os mesmos indicadores estatísticos para análise. Realizaram-se três comparações, decorrentes das diferentes manipulações dos dados de velocidade do vento aplicadas no cálculo da ET_o Rean. Assim, usou-se como preditor da u_2 Rean a u_2 Obs média observada na estação meteorológica (u_2 med). Após comparação efetuou-se a correção do viés da ET_o Rean obtendo-se como produto final valores corrigidos (ET_o Rean Corr).

Na primeira comparação, calculou-se a ET_o e compararam-se os valores diários de ET_o Obs com os ET_o Rean. Entre as estações analisadas, não se identificou nenhuma que apresentasse resultados claramente mais fiáveis, pois existiam distorções nos valores obtidos, possivelmente devido à disponibilidade limitada de dados.

Na segunda comparação, a ET_o foi recalculada usando os dados de reanálise, mas com a substituição dos valores da velocidade do vento pelos valores médios das estações

meteorológicas ($ET_{o \text{ Rean } U_{2 \text{ med}}}$). Esta abordagem levou a uma melhoria dos resultados, evidenciadas pela redução dos erros (RMSE e NRMSE), do PBIAS e b_0 .

Por fim, aplicou-se a correção do viés usando a aproximação multiplicativa, ou seja, dividindo a $ET_{o \text{ Rean}}$ do ponto mais próximo pelo valor de b_0 determinado na comparação entre os dados $ET_{o \text{ Obs}}$ e os dados $ET_{o \text{ Rean}}$, esta última calculada com a média da $U_{2 \text{ Obs}}$. Após esta correção ($ET_{o \text{ Corr}}$), os resultados indicaram uma pronunciada melhoria (Quadro 8).

Quadro 8 - Resultados dos indicadores estatísticos na comparação dos dados de evapotranspiração de referência (ET_o) usando os dados observados nas estações meteorológicas São Pedro de Moel, Fruticultura Vieira Natividade e da Cela e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5) com alternativa à velocidade do vento da reanálise

Comparações Obs + Rean	Indicadores Estatísticos	Estações Meteorológicas		
		SPM	FVN	Cela - SNIRH
$ET_{o \text{ Obs}}$ VS $ET_{o \text{ Rean}}$	R^2	0,68	0,85	0,81
	a	0,17	0,46	0,71
	b	0,85	0,94	0,88
	b_0	0,91	1,08	1,11
	NRMSE (%)	24,50	21,30	22,70
	RMSE (mm)	0,61	0,60	0,60
	EF	0,58	0,78	0,68
	PBIAS	-8,00	10,90	14,30
$ET_{o \text{ Obs}}$ VS $ET_{o \text{ Corr}}$	R^2	0,65	0,87	0,85
	a	0,17	0,45	0,51
	b	0,94	0,86	0,84
	b_0		1,00	
	NRMSE (%)	26,2	16,30	15,90
	RMSE (mm)	0,65	0,46	0,42
	EF	0,52	0,87	0,85
	PBIAS	-0,9	-2,70	2,70
n=N		678	3643	2051

SPM-São Pedro de Moel; FVN- Fruticultura Vieira Natividade; vv - Rean+vvmedia; verde – bom resultado; vermelho – mau resultado

Na Figura 38 apresentam-se para as estações meteorológicas selecionadas os diagramas de extremos e quartis referentes à comparação da $ET_{o \text{ Obs}}$ com a $ET_{o \text{ Corr}}$.

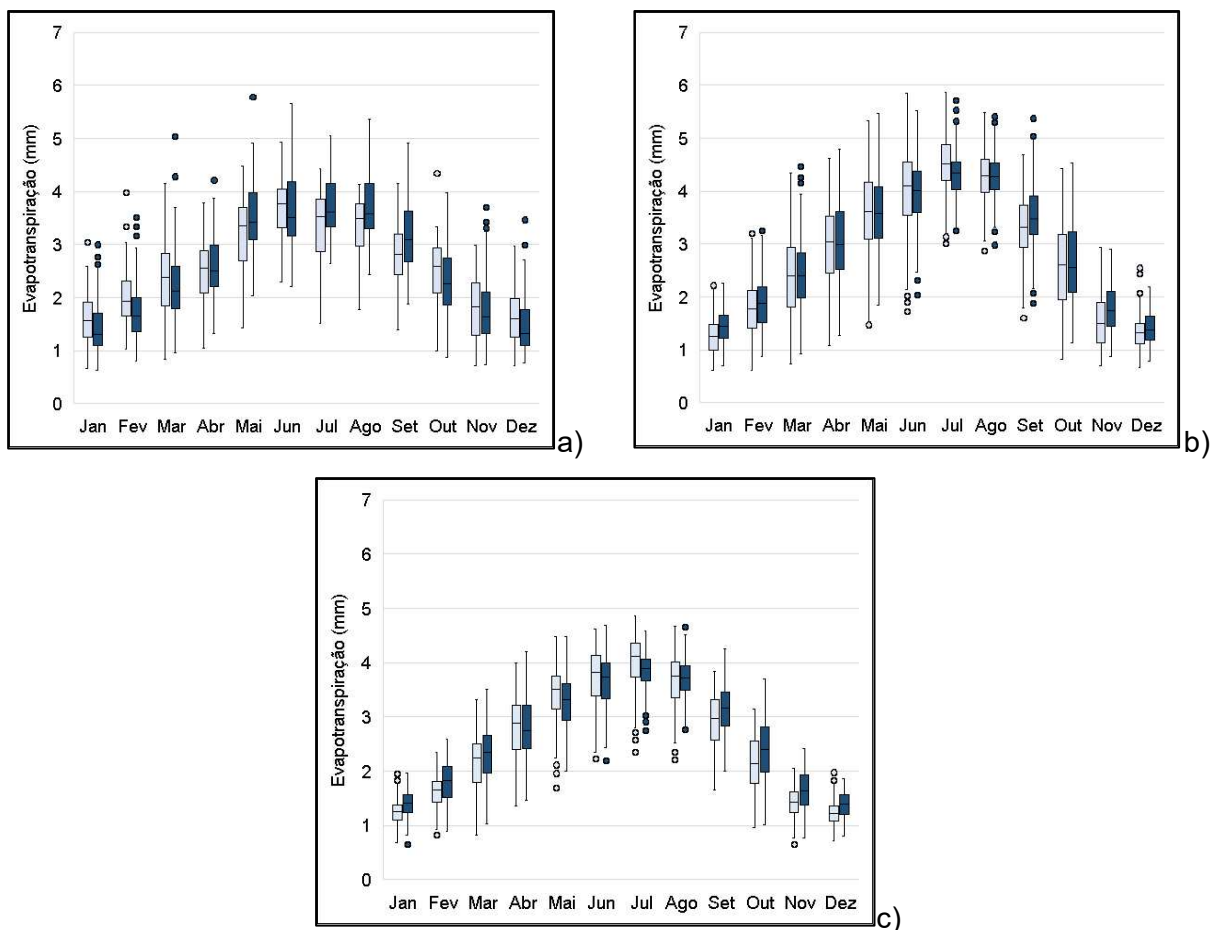


Figura 38 – Diagrama de extremos e quartis relativo à evapotranspiração de referência calculada com os dados observados (□) e com os dados de reanálise e velocidade do vento média das estações após correção (■) nas estações a) SPM, b) FVN, c) Cela - SNIRH.

No geral, a correção do viés foi bem-sucedida, podendo ser visto quando se comparam os resultados de $ET_{o\text{ Obs}}$ e de $ET_{o\text{ Corr}}$ dado que existe uma melhor concordância nos resultados, havendo em alguns casos pouca diferença em termos da variabilidade (Figura 49).

4.2.5. Precipitação

No que se refere à qualidade dos dados de precipitação (Pre), procedeu-se a comparação entre os dados Pre_{Obs} e os da Pre_{Rean} do ponto mais próximo, acumulados anualmente e trimestralmente. Na Figura 39 apresenta-se a comparação entre os valores anuais acumulados de Pre_{Obs} e os da Pre_{Rean} . Como referido anteriormente (Seção 4.1.5) a estação meteorológica de São Pedro de Moel não foi considerada nesta avaliação uma vez que a série de dados de Pre_{Obs} abrangia somente o período 2010-2023 e continha muitas falhas de dados, limitando deste modo a sua utilização.

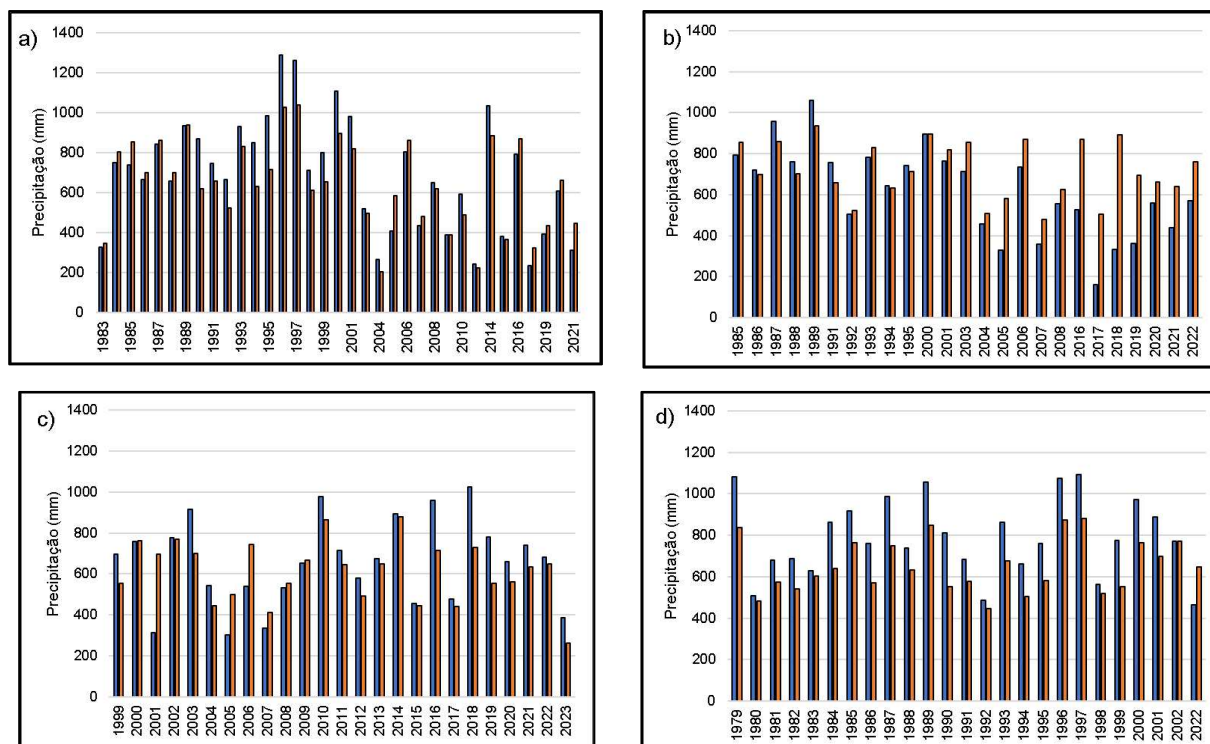


Figura 39 - Comparação de dados de precipitação acumulada anual entre os observados com os da reanálise, sendo as estações: (a) Aljubarrota; (b) Cela-SNIRH; (c) Fruticultura Vieira Natividade e (d) Alfeizerão

Observa-se uma grande variabilidade interanual da precipitação (Figura 40). Na maioria das estações, os anos com maior precipitação acumulada nos dados Pre_{Obs} coincidem com valores elevados nos dados de Pre_{Rean} . A estação de Cela - SNIRH apresenta a menor concordância, especialmente após o ano de 2016, momento a partir do qual se verifica uma elevada discrepância entre os dados Pre_{Obs} e os da Pre_{Rean} .

Na Figura 41 apresentam-se os valores médios mensais de precipitação dos dados Pre_{Obs} e os da Pre_{Rean} , comparados com a normal climatológica da estação Fruticultura Vieira Natividade (1981-2010). Na maioria das estações, os valores médios mensais não atingem os valores da normal climatológica, refletindo a redução da precipitação registada ao longo dos anos (Figura 38). Entre os dados analisados, os valores médios mensais dos dados Pre_{Obs} são, em geral, superiores aos de Pre_{Rean} , ou seja, a reanálise é mais seca. Este padrão ocorre para todas as estações meteorológicas com exceção da estação de Cela-SNIRH.

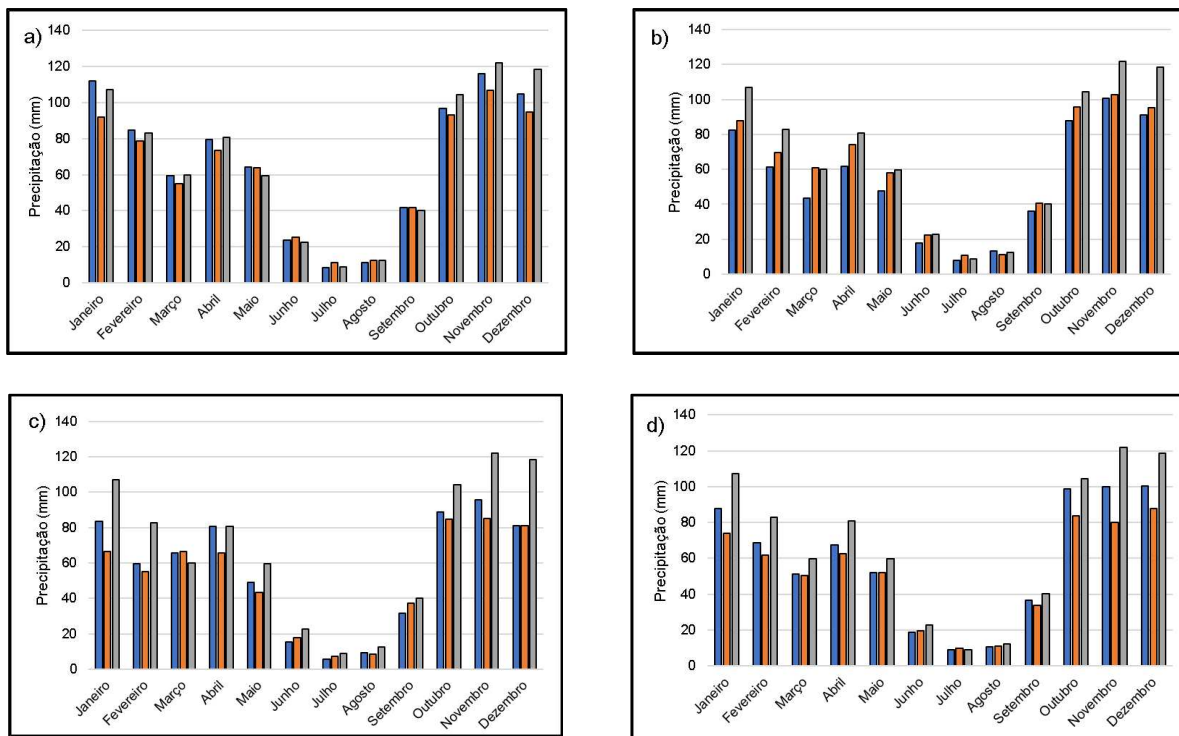


Figura 40 - Comparação de valores médios de precipitação acumulada mensal entre os observados (■) com os da reanálise (■) e da normal climatológica da estação Fruticultura Vieira Natividade (1981-2010) (■), sendo as estações: a) Aljubarrota (1984-2020); b) Cela (SNIRH) (1984-2023); c) Fruticultura Vieira Natividade (1999-2023) e d) Alfeizerão (1979-2023)

Quanto à precipitação acumulada, em termos anuais, os dados não apresentam resultados satisfatórios, visto que determinados indicadores estatísticos, como a EF, apresentam valores que na maioria das vezes não ultrapassam 0,50. Para além disso, registam-se erros absolutos elevados, podendo exceder os 150 mm. Na sequência desta análise os dados diários Pre_{Obs} e os da Pre_{Rean} foram acumulados por trimestre e anualmente nas estações de Aljubarrota, Cela – SNIRH, Fruticultura Vieira Natividade e Alfeizerão. Depois de realizar a primeira comparação, a correção do viés foi efetuada seguindo os seguintes passos: 1) Construíram-se retas de regressão com dados de precipitação acumulada mensal de Pre_{Obs} e os da Pre_{Rean} ; 2) Determinou-se o coeficiente b_0 de cada reta de regressão; 3) Estimaram-se novos dados de Pre_{Rean} multiplicando os valores originais pelo respetivo b_0 mensal; 4) Acumularam-se os dados de precipitação em trimestres e anual, tanto os observados como os corrigidos de Pre_{Rean} ($Pre_{Rean\ Corr}$); Realizou-se uma nova comparação entre os dados Pre_{Obs} e os da $Pre_{Rean\ Corr}$;

Focando nas comparações trimestrais (Quadro 9), conclui-se que, na maioria dos casos, a correção foi bem-sucedida, destacando-se a estação Fruticultura Vieira Natividade, que apresentou os melhores resultados. Após a análise, antes e depois da correção, foram elaborados gráficos de extremos e quartis, apresentados na Figura 41. Pode-se concluir que não

existe uma diferença relevante em termos de variabilidade entre os dados Pre_{Obs} e os da Pre_{Rean} , confirmando que os dados $Pre_{Rean\ Corr}$ não introduzem erros que afetam a análise dos indicadores estatísticos.

Quadro 9 - Resultados dos indicadores estatísticos da comparação dos dados de precipitação observada nas estações meteorológicas Aljubarrota, Fruticultura Vieira Natividade, da Cela-SNIRH, Alfeizerão e o ponto mais próximo da reanálise (ERA5) antes e após a correção do viés.

Estação meteorológicas	Indicadores estatísticos	1º Trimestre		2º Trimestre		3º Trimestre		4º Trimestre		Anual
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	
Aljubarrota	R ²	0,84	0,85	0,74	0,74	0,82	0,85	0,78	0,79	0,62
	b ₀	0,84	0,96	0,95	0,93	0,98	0,94	0,88	0,94	0,90
	NRMSE (%)	25,28	20,70	24,88	25,10	30,63	27,70	24,85	23,10	17,98
	RMSE (mm)	63,82	52,23	39,59	39,89	18,19	16,43	78,90	73,41	145,75
	EF	0,77	0,85	0,73	0,73	0,82	0,85	0,75	0,78	0,53
	PBIAS	-11,79	0,50	-2,37	-3,70	5,79	-0,20	-7,30	0,50	-7,87
	n=N		31		31		31		30	
Frut. Vieira Natividade	R ²	0,79	0,80	0,77	0,79	0,78	0,78	0,88	0,90	0,49
	b ₀	0,73	0,90	0,85	1,02	1,20	0,92	0,84	1,01	0,90
	NRMSE (%)	36,69	25,82	22,72	18,71	57,34	40,37	20,49	12,44	23,26
	RMSE (mm)	82,61	58,16	35,77	29,46	18,54	13,05	52,61	31,93	152,28
	EF	0,58	0,79	0,64	0,76	0,55	0,78	0,71	0,89	0,45
	PBIAS	-24,63	-6,67	-13,69	2,77	32,13	1,70	-14,45	2,97	-6,45
	n=N		13		12		11		11	
Cela-SNIRH	R ²	0,70	0,76	0,53	0,54	0,53	0,56	0,77	0,76	0,43
	b ₀	1,08	0,91	1,08	0,88	0,97	0,86	0,97	0,93	1,09
	NRMSE (%)	36,5	28,90	46,20	39,30	52,60	47,80	25,70	25,70	31,05
	RMSE (mm)	69,05	54,64	58,40	49,58	27,19	24,71	72,05	72,00	192,08
	EF	0,63	0,75	0,35	0,53	0,47	0,56	0,76	0,76	0,20
	PBIAS	16,60	-2,20	21,00	-1,40	13,6	-0,1	4,4	-0,70	16,72
	n=N		34		34		34		33	
Alfeizerão	R ²	0,71	0,79	0,69	0,69	0,63	0,62	0,77	0,77	0,74
	b ₀	0,81	0,88	0,91	0,91	0,90	0,83	0,77	0,92	0,81
	NRMSE (%)	37,29	28,64	27,41	27,37	38,60	40,15	31,81	24,32	21,73
	RMSE (mm)	78,91	62,56	39,11	39,05	21,85	22,32	97,78	74,78	171,88
	EF	0,66	0,78	0,68	0,68	0,63	0,60	0,59	0,76	0,13
	PBIAS	-10,59	-6,50	-4,14	-3,57	-1,77	-9,82	-17,81	-1,98	-17,69
	n=N		32		35		33		31	

Significado das cores: verde – bom resultado; vermelho – mau resultado.

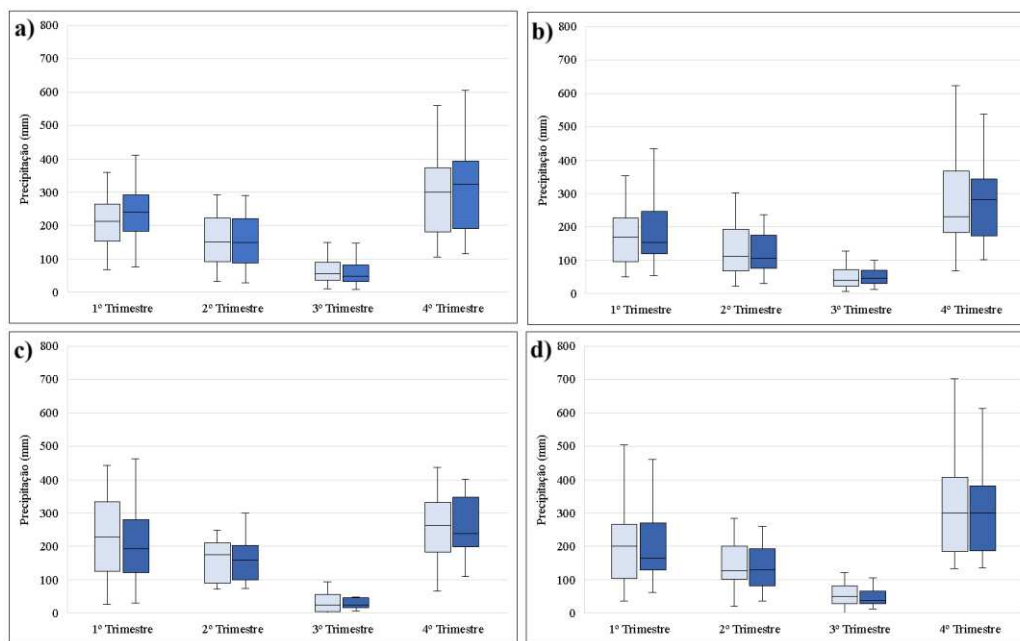


Figura 41 - Comparação entre os dados Obs (□) e os de Rean (■) nas estações a) Aljubarrota, b) Cela do SNIRH, c) Fruticultura vieira Natividade e d) Alfeizerão com dados de precipitação acumulada por trimestre.

Em termos trimestrais, nenhuma estação se destacou por apresentar melhor desempenho. Verifica-se que, nos indicadores R^2 e EF, existe uma diferença em termos dos resultados obtidos para as comparações realizadas. Um exemplo é a estação FVN, que no indicador R^2 apresenta um desempenho semelhante ao de Aljubarrota. Contudo, relativamente ao EF, a estação FVN apresenta valores inferiores aos de Alfeizerão nos três primeiros trimestres. No que respeita ao PBIAS, o enviesamento da estação FVN no terceiro trimestre é o mais elevado comparativamente às restantes estações. Estes resultados poderão estar relacionados com a disponibilidade de observações, uma vez que se utilizaram, no máximo, 13 observações na estação FVN, enquanto nas outras estações foram registadas até 30 observações.

4.3. Indicadores bioclimáticos

Relativamente aos indicadores bioclimáticos, estes foram calculados usando as séries de dados ERA5 após correção do viés. Os resultados são apresentados no Quadro 10.

No presente estudo, registou-se um total médio de 444 HF no período de outubro a fevereiro. Este valor, quando comparado com a literatura, revela implicações distintas para cada espécie e para diferentes cultivares dentro de cada cultura.

Quadro 10 – Resultados dos indicadores bioclimáticos calculados para o ponto central do Aproveitamento hidroagrícola de Cela.

Indicadores Bioclimáticos		Ponto Central AHC	Períodos
Horas de frio (HF)		444	Outubro - Fevereiro
Stress Térmico (nº de dias)		3	Maio - Agosto
Índice de aridez		0,97	Anual
Acumulação Térmica (°C)	T _b =3,5 °C	773	Fevereiro - Abril
	T _b =0 °C	1085	
	T _b =2 °C	2871	Dezembro - Julho
	T _b =4,5 °C	2600	Março - Setembro
Precipitação Acumulada (mm)	1º Trimestre	230	Dezembro - Fevereiro
	2º Trimestre	151	Março - Maio
	3º Trimestre	45	Junho - Agosto
	4º Trimestre	245	Setembro - Novembro

A literatura indica que as necessidades de frio da macieira variam amplamente, desde cerca de 300 HF para cultivares de baixa exigência, até mais de 1 000 HF para variedades de clima temperado frio (Luedeling et al., 2009; Atkinson et al., 2013). Ensaio com cultivares específicas revelam que ‘Condessa’ necessita de cerca de 350–450 HF, enquanto ‘Granny Smith’ requer 600–700 HF e ‘Royal Gala’ entre 700–800 HF (Hawerth et al., 2010). Assim, o valor observado de 444 HF seria adequado para cultivares de baixa exigência, mas insuficiente para a maioria das cultivares de média ou alta exigência, podendo resultar em floração irregular, prolongada ou com falhas na frutificação.

As pereiras apresentam igualmente uma grande amplitude de exigências de frio, variando entre menos de 400 HF para cultivares de baixa exigência, até mais de 1 000 HF para cultivares europeias tradicionais (Fornaciari et al., 2010; Zhang et al., 2024). Por exemplo, a cultivar ‘Cuiguan’ pode completar a dormência com menos de 400 HF, enquanto ‘Suli’ requer entre 800–1 000 HF (Zhang et al., 2024). Híbridos como ‘Florida Home’ e ‘Hood’, desenvolvidos para climas amenos, necessitam de cerca de 250 HF (Bell et al., 1996). Com 444 HF, a região estudada apresenta condições adequadas para cultivares de baixa exigência, mas insuficientes para variedades de referência europeia como ‘Conference’ ou ‘Rocha’, que se situam tipicamente acima de 800 HF (Pérez-Pastor et al., 2023). Fez-se a comparação dos dados de horas de frio acumulados no período definido entre os dados Obs com os de Rean, para verificar a fiabilidade dos dados de reanálise.

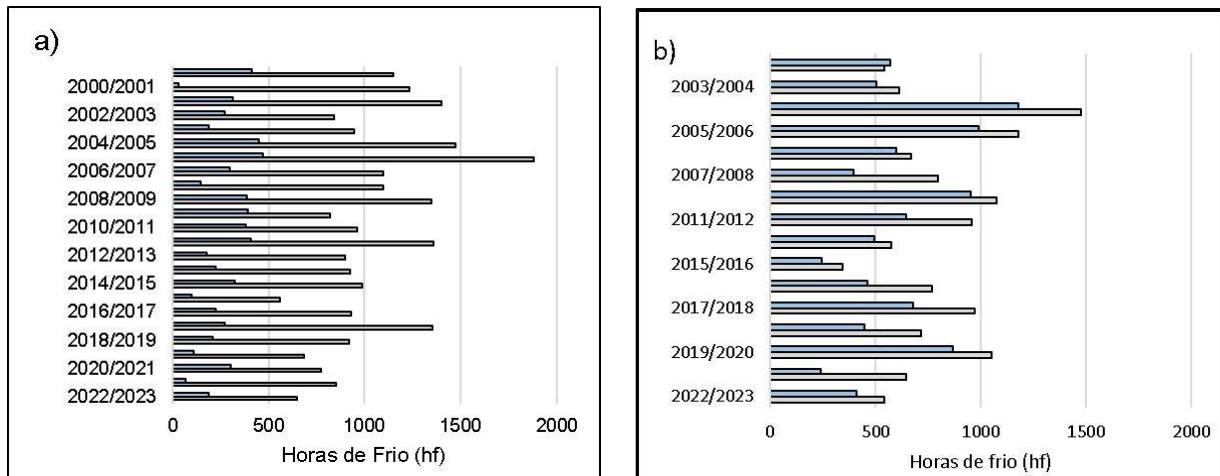


Figura 42 – Comparação de horas de frio entre os dados Obs (■) com os de Rean (■) nas estações: a) Fruticultura de Vieira Natividade e b) Cela – SNIRH

Na Figura 42, observa-se uma maior diferença no número de horas de frio acumuladas na estação Fruticultura Vieira Natividade do que na estação Cela-SNIRH. Ambas as comparações apresentam dados do Rean, utilizando as variáveis T_{max} e T_{min} para determinar o número de horas de frio, conforme referido na Secção 3.6. Importa recordar que ambas as variáveis foram submetidas a correção de viés, o que permitiu uma comparação mais consistente, como se verifica na Figura 43b. Pelo contrário, no caso da Figura 43a, essa correção não resultou numa maior aproximação dos resultados.

No índice de aridez, obteve-se o valor 0,97 que indica um clima **húmido** segundo as classificações UNEP/UNESCO. Em termos práticos, um AI próximo de 1 indica que a precipitação média anual se aproxima da evapotranspiração potencial, ou seja, a produção agrícola em média não é, a nível anual, limitada pela água disponível; contudo, a forte sazonalidade da precipitação (verão muito seco) altera essa conclusão quando se considera a fenologia da macieira — a disponibilidade hídrica durante a época de enchimento e crescimento do fruto é crítica (Tegos, 2023).

Sobre as temperaturas base $T_b = 3,5\text{ °C}$ e $T_b = 0\text{ °C}$, a acumulação térmica quer para a maçã quer para a pêra não demonstram risco de ocorrer uma má floração, sabendo que para que haja boas condições para uma floração bem-sucedida é necessário ultrapassar 587 GDD para a maçã e 709 GDD para a cultura da pêra (Sousa 2022);

No que diz respeito à acumulação térmica, com $T_b = 4,5\text{ °C}$, verifica-se que, em todos os pontos da reanálise foi possível acumular mais do que 2600 GDD (março a setembro). Na cultura da couve, que pode ser instalada em março, a colheita é possível a partir de junho, uma vez que se

ultrapassam a acumulação térmica de 960 GDD necessários (Sim et al., 2021). As conclusões obtidas para as estações de crescimento em função do GDD é, no entanto, limitadas, pois alguns estudos determinam os GDD em função do número de dias decorridos após a polinização. Na cultura da maçã, Stanley et al. (2000), identificaram uma correlação significativa entre o peso dos frutos aos 50 dias após a polinização e a acumulação térmica, considerando 10 °C como temperatura base. Também foi observada uma forte correlação entre a acumulação térmica ($T_b = 10\text{ °C}$) desde os 30 dias após a polinização até à colheita. Além disso, recomenda-se o uso de $T_b = 5\text{ °C}$ ao longo do crescimento do fruto (Warrington et al., 1999) e $T_b = 4\text{ °C}$ para o desenvolvimento dos gomos (Hofstra & Hesketh, 1969). Alexander et al. (2016) utilizaram $T_b = 5,6\text{ °C}$ entre 1 de janeiro e 31 de outubro, e $7,2\text{ °C}$ entre 1 de outubro e 31 de maio. Para a cultura da pêra, Vitasse et al. (2018) usaram $T_b = 5\text{ °C}$, enquanto Singh et al. (2017) consideraram 10 °C .

Relativamente à acumulação térmica com $T_b = 2\text{ °C}$, verifica-se que é possível cumprir os períodos habituais de colheita. De acordo com as informações disponíveis na “PORBATATA” referentes às regiões Oeste e Ribatejo (Abreu et al., 2022) se a plantação ocorrer entre meados de dezembro e janeiro, a colheita pode ser realizada em junho.

Por fim, a precipitação acumulada foi analisada por trimestres, registando-se 232 mm no primeiro trimestre (dezembro–fevereiro), 152 mm no segundo trimestre (março–maio), 45 mm no terceiro trimestre (junho–agosto) e 243 mm no quarto trimestre (setembro–novembro).

A distribuição observada apresenta um padrão típico de clima mediterrânico, caracterizado por invernos chuvosos e verões secos (Lionello et al., 2006). Este regime é particularmente relevante para culturas como a macieira e a pereira, que apresentam fases fenológicas com diferentes exigências hídricas ao longo do ano.

Durante o primeiro trimestre, a elevada precipitação coincide com o período de dormência, contribuindo para a recarga dos aquíferos e para a saturação do perfil do solo. Contudo, excesso de água no solo nesta fase pode aumentar o risco de asfixia radicular em solos mal drenados (Ferreira et al., 2019).

No segundo trimestre, que engloba a floração e o início do desenvolvimento dos frutos, a precipitação moderada de 152 mm pode ser benéfica para reduzir a necessidade de rega suplementar. No entanto, precipitações excessivas durante a floração podem favorecer a incidência de doenças fúngicas como o pedrado (*Venturia inaequalis* na macieira e *Venturia pyrina* na pereira) (MacHardy, 1996).

O terceiro trimestre apresentou valores extremamente baixos (45 mm), típicos do verão mediterrânico, implicando a necessidade de rega para manter o potencial produtivo e a qualidade dos frutos. A insuficiência hídrica nesta fase pode resultar em frutos de calibre reduzido, aumento da concentração de sólidos solúveis e, em casos extremos, escaldão solar (Pérez-Pastor et al., 2014).

Finalmente, o quarto trimestre, com 243 mm, coincide com a fase final da maturação (em cultivares mais tardias) e com o início da nova estação de crescimento vegetativo. Chuvas excessivas perto da colheita podem reduzir a qualidade pós-colheita, aumentar a incidência de rachaduras e favorecer podridões (Fallahi et al., 2010).

4.4. Cartografia de mapas temáticos

Nos seguintes mapas apresentam-se os dados criados por interpolação geoespacial para (inverso do quadro da distância) o AHC. Esse dado provém de valores médios elaborados nos Pontos referidos na secção 3.6. Na Figura 43, verifica-se que não existem horas de frio suficientes para as culturas de maçã e pêra, mesmo após a aplicação da correção de viés. Tal como observado na Figura 43a, a diferença é acentuada: nos dados Obs, todos os valores ultrapassam as 500 horas de frio, enquanto nos dados Rean nenhum atinge esse patamar. Na Figura 45, é visto que não há nenhum risco de as culturas serem prejudicadas pelo stress térmico.

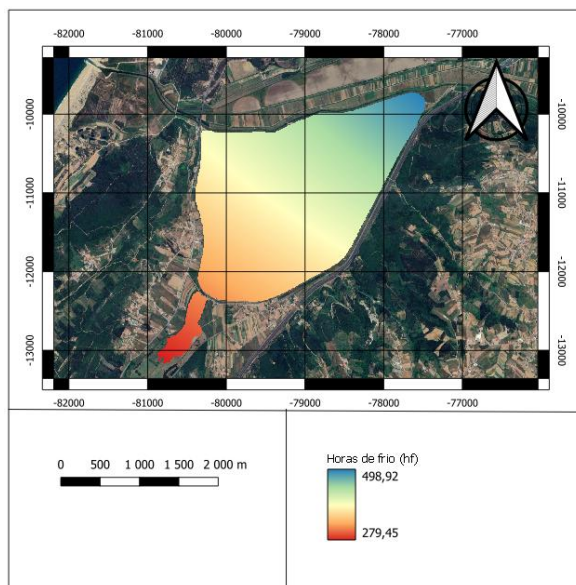


Figura 43 – Determinação de horas de frio por Interpolação Geoespacial no AHC;

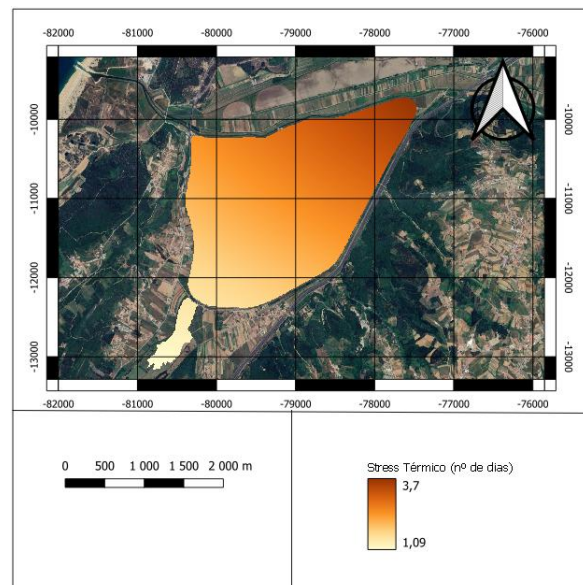


Figura 44 – Determinação de número de dias com stress térmico por interpolação geoespacial no AHC;

Na figura 46 e 47, é visto que há condições da temperatura média para haver floração. O mesmo se pode dizer por observação das Figuras 48 e 49, em que o AHC oferece condições ideais para a sua produção.

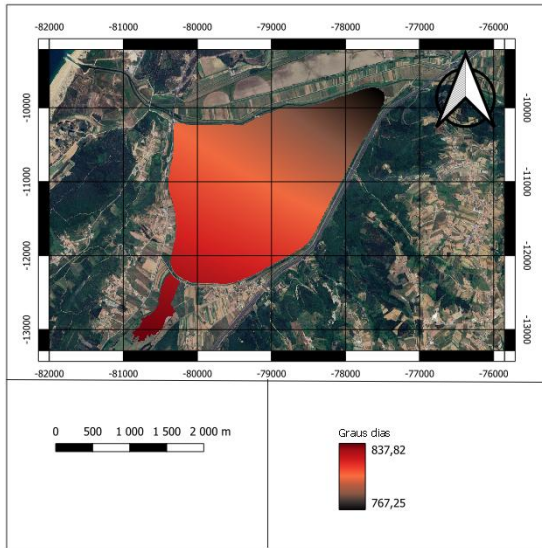


Figura 45 – Acumulação térmica com $T_b=3,5\text{ °C}$ por Interpolação Geoespacial no AHC;

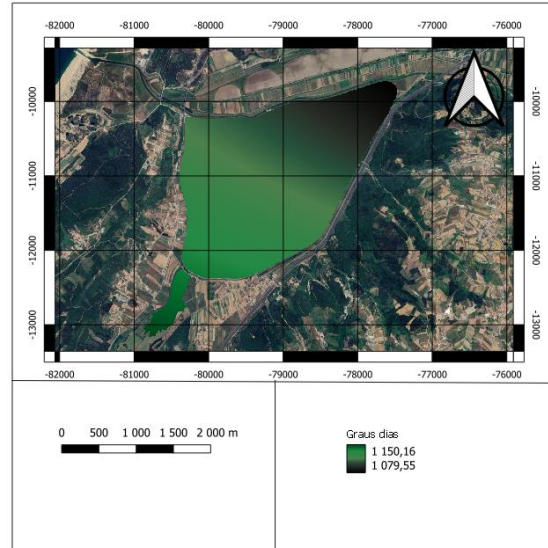


Figura 46- Acumulação térmica com $T_b=0\text{ °C}$ aplicada comente para a cultura da pêra na fase da floração

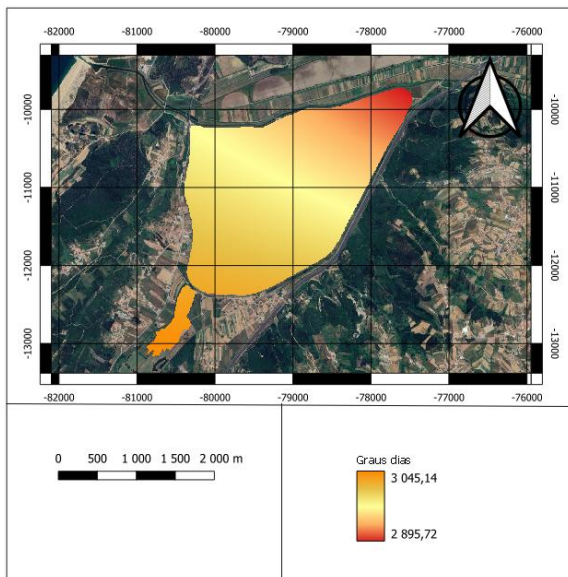


Figura 47 - Acumulação térmica com $T_b= 2\text{ °C}$ por Interpolação Geoespacial no AHC;

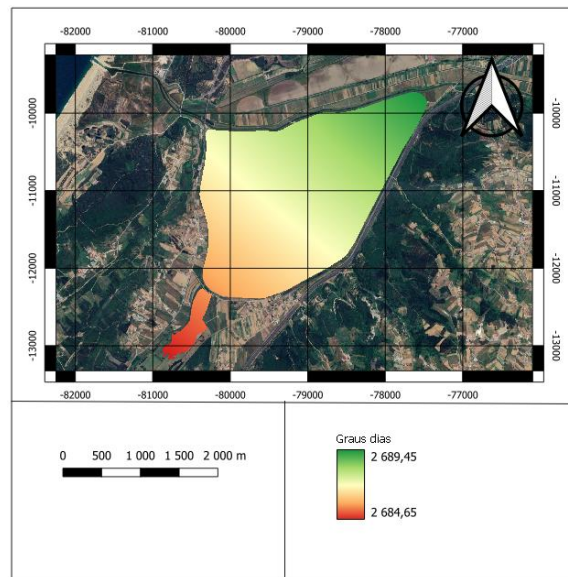


Figura 48 - Acumulação térmica com $T_b= 4,5\text{ °C}$ por Interpolação Geoespacial no AHC

Por fim na precipitação acumulada trimestralmente (Figuras 50, 51, 52 e 53), apresenta os valores típicos de um clima mediterrânico, havendo mais precipitação no 1º e 4º trimestre e menos no 2º e 3º Trimestre

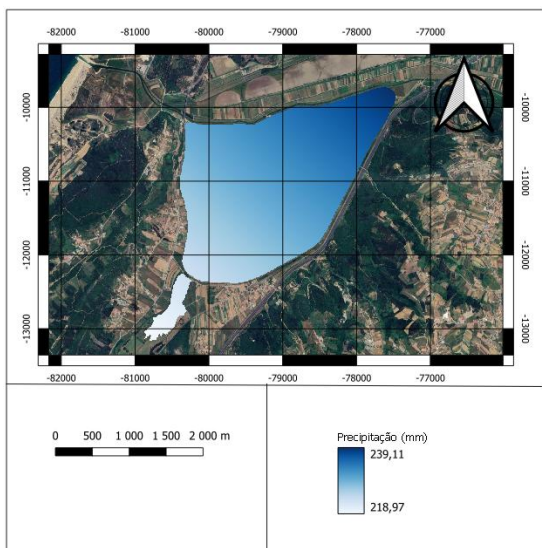


Figura 49 - Precipitação média acumulada no 1º Trimestre por Interpolação Geoespacial no AHC;

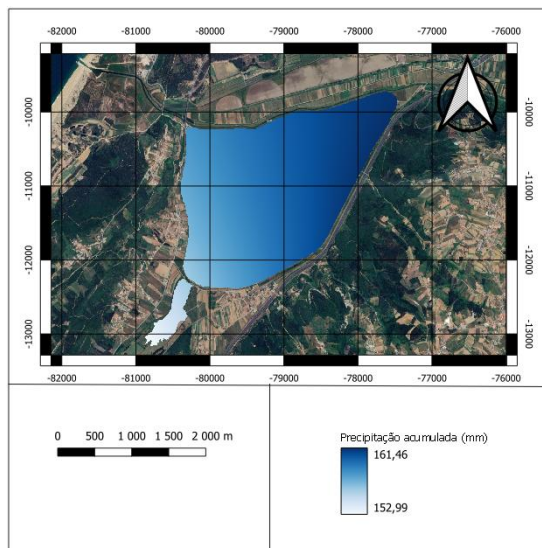


Figura 50 – Precipitação Média acumulada no 2º Trimestre por Interpolação Geoespacial no AHC

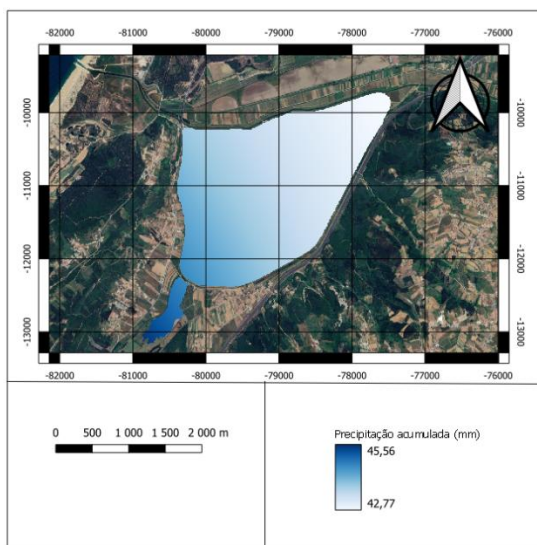


Figura 51 - Precipitação média acumulada no 3º Trimestre por Interpolação Geoespacial no AHC

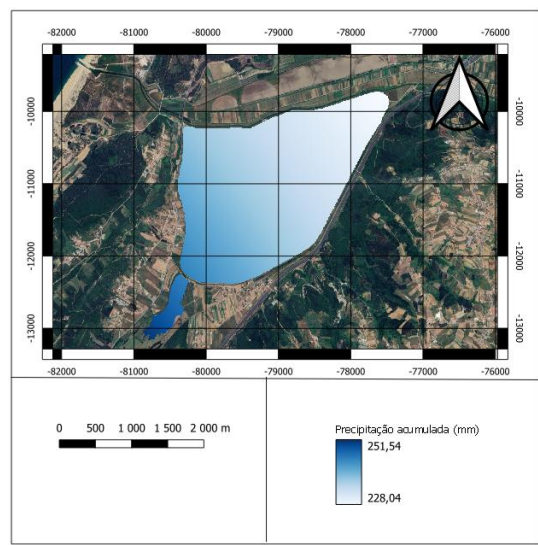


Figura 52 - Precipitação média acumulada no 4º Trimestre por Interpolação Geoespacial no AHC

Para além destes mapas, foram criados outros, apresentados em Anexo (4-10), com informação complementar nomeadamente a capacidade de o solo de disponibilizar água para uma dada cultura usando mapas criados com dados da capacidade de campo (Anexo 4) com o coeficiente de emurchecimento (Anexo 5) determinando a RU, para as produtividades radiculares da batata (Anexo 6), da couve (Anexo 7) e da maçã e pêra (Anexo 8). Por fim, também são apresentados mais dois mapas sobre a profundidade da água subterrânea no solo sendo o primeiro com dados

de valores médios em março – final da época húmida (Anexo 9) enquanto o segundo são de agosto – época seca (Anexo 10).

Olhando para os resultados que cada mapa apresenta, não é possível realizar um zonamento agroclimático pois as diferenças entre cada variável são pequenas. Ainda assim, não se deixa tirar conclusões relevantes acerca das condições para a produção agrícola estimadas com os indicadores bioclimáticos calculados pelos dados ERA5.

5. Conclusões e perspectivas futuras

Conclui-se que a avaliação da integridade e da qualidade dos dados meteorológicos observados é fundamental em qualquer estudo, mas assume particular importância nos estudos que dependem diretamente deste tipo de dados. A utilização de dados de reanálise é muito importante quando se pretende obter uma representação espacial de uma área, um aproveitamento hidroagrícola ou de uma região. No entanto, a comparação dos dados observados com os dados de Rean permitiu uma utilização mais segura dos dados meteorológicos de reanálise. Os resultados mais relevantes deste estudo foram a comparação entre os dados Obs e os dados Rean para as variáveis ET_0 e precipitação acumulada trimestral, bem como os indicadores bioclimáticos relacionados com a acumulação térmica e o número de horas de frio.

Na comparação entre os dados Obs e Rean, tanto para a ET_0 como para a precipitação acumulada trimestral, constatou-se a existência de um viés que foi necessário corrigir. Relativamente ao número de horas de frio, os dados de Rean apresentaram valores inferiores aos dados Obs, o que, para o Aproveitamento Hidroagrícola de Cella (AHC), poderá levar a uma interpretação errada, sugerindo que o número de horas de frio será insuficiente, o que não corresponde aos registos das estações meteorológicas estudadas.

Os mapas produzidos apresentam valores com uma variabilidade climática reduzida, o que não permite definir zonas diferenciadas de aptidão.

Em estudos futuros, deverá efetuar-se o zonamento usando cenários de alterações climáticas para apoiar quer os agricultores como o gestor do perímetro de rega na tomada de decisão no médio longo prazo sobre as culturas a serem instaladas, nomeadamente as culturas perenes. Será possível acrescentar mais indicadores bioclimáticos e incluir outras culturas, podendo ainda, caso se incorpore o número de horas de frio, proceder à correção do viés desses dados. Estes zonamentos devem-se aplicar em zonas com áreas agrícolas de maior escala para que os pontos da grelha se situam dentro desta, e onde exista uma maior variabilidade espacial.

Referências bibliográficas

- Abreu, A. M. P. G. (2022). Utilização das Unidades de Acumulação Térmica Como Ferramenta de Gestão das Culturas e da Rega (Master's thesis, Universidade de Lisboa (Portugal)).
- Akbar, S., Riaz, A., Mahmood, T., Hashmi, A. J., & Kazmi, D. H. (2025). A guide to irrigation requirement of wheat crop in FAO-developed agro-climatic zones of Punjab, Pakistan. *Discover Agriculture*, 3(1), 41.
- Aladenola, O. O., & Madramootoo, C. A. (2014). Evaluation of solar radiation estimation methods for reference evapotranspiration estimation in Canada. *Theoretical and Applied Climatology*, 118(3), 377–385. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1070-2>
- Alexander, T. R., King, J., Zimmerman, A., & Miles, C. A. (2016). Regional variation in juice quality characteristics of four cider apple (*Malus × domestica* borkh.) cultivars in northwest and central Washington. *HortScience*, 51(12), 1498–1502. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11209-16>
- Allen, R. G. (1996). Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 122(2), 97-106.
- Allen, R. (2008). Quality assessment of weather data and micrometeorological flux-impacts on evapotranspiration calculation. *農業気象*, 64(4), 191-204.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9)
- Almorox, J., Bocco, M., & Willington, E. (2013). Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. *Renewable Energy*, 60, 382–387. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.033>
- Almorox, J., Hontoria, C., & Benito, M. (2011). Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). *Applied Energy*, 88(5), 1703–1709. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.003>
- Andrade, G. A., Ricce, W. da S., Caramori, P. H., Zaro, G. C., & Medina, C. de C. (2012). Zoneamento agroclimático de café robusta no Estado do Paraná e impactos das mudanças climáticas. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(4), 1381–1390. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n4p1381>
- Anwar, S. A., Malcheva, K., & Srivastava, A. (2023). Estimating the potential evapotranspiration of Bulgaria using a high-resolution regional climate model. *Theoretical and Applied Climatology*, 152(3–4), 1175–1188. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04438-9>
- Aparecido, L. E. de O., Rolim, G. de S., de Moraes, J. R. da S. C., Rocha, H. G., Lense, G. H. E., & Souza, P. S. (2018). Agroclimatic zoning for urucum crops in the state of Minas Gerais, Brazil. *Bragantia*, 77(1), 193–200. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2016527>
- Arnold, C. Y. (1959). The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Journal article: Proceedings. American Society for Horticultural Science*, 1959, Vol. 74, 430-45 ref. bibl. 18

- ARRUDA, F. P., BELTRÃO, N. E. D. M., DE ANDRADE, A. P., PEREIRA, W. E., & SEVERINO, L. S. (2004). Cultivo de pinhão manso (*Jatropha curca* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. *Revista brasileira de oleaginosas e fibrosas*, 8(1).
- Atkinson, C. J., Brennan, R. M., & Jones, H. G. (2013). Declining chilling and its impact temperate perennial crops. *Environmental and Experimental Botany*, 91, 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.02.004>
- Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C., Villaume, S., Bidlot, J. R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., & Thépaut, J. N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186–4227.
- Bell, R. L., Quamme, H. A., & Layne, R. E. C. (1996). Pears. In *Fruit Breeding* (pp. 441–514). Wiley.
- Bento, V. A., Ribeiro, A. F. S., Russo, A., Gouveia, C. M., Cardoso, R. M., & Soares, P. M. M. (2021). The impact of climate change in wheat and barley yields in the Iberian Peninsula. *Scientific Reports*, 11(1), 15484.
- Wouters, H., Berckmans, J., Maes, R., Vanuytrecht, E., & De Ridder, K. (2021). Downscaled bioclimatic indicators for selected regions from 1950 to 2100 derived from climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
- Bonhomme, R., 2000. Bases and limits to using ‘degree. day’units. *Eur J Agron* 13(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00058-7)
- Boogaard, H., Schubert, J., De Wit, A., Lazebnik, J., Hutjes, R., & Van der Grijn, G. (2020a, April 18). Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.6c68c9bb>
- Brown, D., de Sousa, K., & van Etten, J. (2023). ag5Tools: An R package for downloading and extracting agrometeorological data from the AgERA5 database. *SoftwareX*, 21, 101267. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101267>
- Camargo, (1984). Exigências bioclimáticas e estimativa da produtividade para quatro cultivares de soja no Estado de São Paulo (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Campoy, J. A., Ruiz, D., & Egea, J. (2011). Dormancy in temperate fruit trees in a global warming context: A review. *Scientia Horticulturae*, 130(2), 357–372. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.011>
- Cano-Ortiz, A., Musarella, C. M., & Cano, E. (2024). Educational Strategies for Teaching Climate and Bioclimate in Response to Global Change. *Climate*, 12(11), 174.
- Caroça, C., “Plano de Gestão de Recursos Hídricos na Várzea da Nazaré - Obra de Fomento Hidroagrícola em Paúl da Cela”. Final Written Work in the scope of the Post-Graduate Water

Law Course of the Institute of Political Juridical Sciences of the Faculty of Law of the University of Lisbon, Lisbon, 2012e, 31 p.;

- Challi, D. O. U. N. I. A., Dahmani, J. A. M. I. L. A., Jdi, E. B. N., & Belahbib, N. (2021). Evolution of climatic conditions between 1982 and 2016 in the Sidi Boughaba biological reserve (Kénitra, Morocco). *Journal of Basic and Applied Research International*, 27(5), 18-28.
- Chemura, A., Kutwayo, D., Chidoko, P., & Mahoya, C. (2016). Bioclimatic modelling of current and projected climatic suitability of coffee (*Coffea arabica*) production in Zimbabwe. *Regional Environmental Change*, 16(2), 473–485.
- Chen, B. M. (2001). *The integrated agricultural resources production capability and population supporting capacity in China*. Beijing: Meteorological Press. 417 p. ISBN: 978-7502932626.
- Chou, C., Marcos-Matamoros, R., López-Navado, J., López-Feria, S., & González-Reviriego, N. (2023). Comparison of five strategies for seasonal prediction of bioclimatic indicators in the olive sector. *Climate Services*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100345>
- Copernicus. (n.d.). *Acerca do Copernicus*. Recuperado em 26 de fevereiro de 2024, de <https://www.copernicus.eu/pt-pt/acerca-do-copernicus>
- Costa, W.D.S., Dallacort, R., de Carvalho, M.A.C. and dos Santos, S.B., 2022. Sistema Web para pré-processamento e análise de dados meteorológicos. *Revista Brasileira de Climatologia*, 30, pp.591-610.
- Dave, V., Pandya, M., & Ghosh, R. (2019). Identification of desertification hot spot using aridity index. *Ann. Arid Zone*, 58(1–2), 39–44.
- de Olanda Souza, G. H., de Oliveira Aparecido, L. E., de Lima, R. F., Torsoni, G. B., Chiquitto, A. G., & de Moraes, J. R. C. (2022). Agroclimatic zoning for bananas under climate change in Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(14), 6511–6529.
- Dell’Aquila, A., Graça, A., Teixeira, M., Fontes, N., Gonzalez-Reviriego, N., Marcos-Matamoros, R., Chou, C., Terrado, M., Giannakopoulos, C., & Varotsos, K. V. (2023). Monitoring climate related risk and opportunities for the wine sector: The MED-GOLD pilot service. *Climate Services*, 30, 100346.
- Rosário, L. P., del Barrio Escribano, G., Sanjuán, M. E., de Larramendi, A. R., Martínez-Valderrama, J., & Tomás, J. P. (2015). Prioridades de aplicação do Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação com base nas condições do solo. *Proteção Do Solo e Combate à Desertificação: Oportunidade Para as Regiões Transfronteiriças*, 47–59.
- Dufault, R. J. (1997). Determining heat unit requirements for broccoli harvest in coastal South Carolina. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122(2), 169–174. <https://doi.org/10.21273/JASHS.122.2.169>
- Eccel, E., Zollo, A. L., Mercogliano, P., & Zorer, R. (2016a). Simulations of quantitative shift in bio-climatic indices in the viticultural areas of Trentino (Italian Alps) by an open source R package. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 92–100.
- Eisenhauer, J. G. (2003). Regression through the origin. *Teaching Statistics*, 25(3), 76–80.

- Erez, A. (2000). Bud dormancy; phenomenon, problems and solutions in the tropics and subtropics. In *Temperate Fruit Crops in Warm Climates* (pp. 17–48). Springer.
- Fagbayide SD, Ewemoje TA, Oluwasemire KO (2019) Experimental determination of growth-stage-specific crop coefficient of *Jatropha curcas* in sub-humid region of Nigeria. ASABE Annual Int Meeting 1900465. <https://doi.org/10.13031/aim.20190465>
- Falasca, S., Ulberich, A., & Pitta-Alvarez, S. (2017). Development of agroclimatic zoning model to delimit the potential growing areas for macaw palm (*Acrocomia aculeata*). *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 1321–1333. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1850-6>
- Fallahi, E., et al. (2010). Irrigation and nitrogen management impacts on fruit quality, yield, and mineral nutrient relations in ‘Fuji’ apple. *HortScience*, 45(9), 1387–1392.
- FAO, 2000. The Ecocrop Database. FAO Rome, Italy. Disponível em: <https://gaez.fao.org/pages/ecocrop>
- Faraslis, I., Dalezios, N., Alpanakis, N., Tziatzios, G., Spiliotopoulos, M., Sakellariou, S., Sidiropoulos, P., Dercas, N., & Brissimis, V. (2024). Agroclimatic zoning methodology for selection of suitable crop in water limited Mediterranean areas. EGU General Assembly Conference Abstracts, 20715.
- Feio, M. (1991). *Clima e agricultura*. Direcção de Planeamento e Agricultura.
- Ferreira, M. I., et al. (2019). Water relations, water use and irrigation requirements of apple orchards. *Acta Horticulturae*, 1234, 89–96. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1234.12>
- Fernandez, E., Mojahid, H., Fadón, E., Rodrigo, J., Ruiz, D., Egea, J. A., Ben Mimoun, M., Kodad, O., El Yaacoubi, A., & Ghrab, M. (2023). Climate change impacts on winter chill in Mediterranean temperate fruit orchards. *Regional Environmental Change*, 23(1), 7.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315.
- Fischer, G., Shah, M., N. Tubiello, F., & Van Velhuizen, H. (2005). Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2067–2083.
- Fonseca, A., Andrade, C., & Santos, J. A. (2022). Agricultural Water Security under Climate Change in the Iberian Peninsula. *Water (Switzerland)*, 14(5).
- Fornaciari, M., Pieroni, L., & Busetto, L. (2010). Chilling and heat requirements for flowering of pear and apple in Italy. *Italian Journal of Agrometeorology*, 15(1), 39–50.
- Freitas, T. R., Santos, J. A., Paredes, P., & Fraga, H. (2024). Future aridity and drought risk for traditional and super-intensive olive orchards in Portugal. *Climatic Change*, 177(10), 155.
- Freitas, T. R., Santos, J. A., Silva, A. P., Fonseca, A., & Fraga, H. (2023). Evaluation of historical and future thermal conditions for almond trees in north-eastern Portugal. *Climatic Change*, 176(7), 89.

- Garbanzo, G., Céspedes, J., Temudo, M., do Rosário Cameira, M., Paredes, P., & Ramos, T. (2025). Advances in soil salinity diagnosis for mangrove swamp rice production in Guinea Bissau, West Africa. *Science of Remote Sensing*, 100231.
- Garcia, D., Silva, N., Rolim, J., Ferreira, A., Santos, J. A., Cameira, M. D. R., & Paredes, P. (2025). Prediction of Crops Cycle with Seasonal Forecasts to Support Decision-Making. *Agronomy*, 15(6), 1291.
- García-Ruiz, J. M., & Lana-Renault, N. (2011). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region—A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3–4), 317–338.
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3–4), 121–139.
- Garcia, D.; Silva, N.; Rolim, J.; Ferreira, A.; Santos, J.A.; Cameira, M.R.; Paredes, P. Prediction of Crops Cycle with Seasonal Forecasts to Support Decision-Making. *Agronomy* 2025, 15, 1291. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061291>
- Gaur, M. K., & Squires, V. R. (2017). Geographic extent and characteristics of the world's arid zones and their peoples. In *Climate variability impacts on land use and livelihoods in drylands* (pp. 3-20). Cham: Springer International Publishing.
- Gladstones(1992) *Viticulture and environment*. ISBN: 978-1-875130-12-2. Underdale, South Australia. Winetitles
- Gladstones, J. (2011). *Wine, Terroir and Climate Change*. Kent Town, South Australia: Wakefield Press.
- Goodchild, M. F., Longley, P. A., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographic information systems and science*. Wiley & Sons, West Sussex, UK, 17, 517.
- Gouveia, C. M., Trigo, R. M., Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., & Liberato, M. L. R. (2019). Assessment of Growing Thermal Conditions of Main Fruit Species in Portugal Based on Hourly Records from a Weather Station Network. *Applied Sciences*, 9(18), 3782. <https://doi.org/10.3390/app9183782>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:2(135))
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225–230.
- Hargreaves & Samani (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7, 109 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

- Hawerth, F. J., Petri, J. L., & Leite, G. B. (2010). Requisitos de frio de cultivares de macieira no Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32(2), 287–293. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452010005000024>
- Heide, O. M., Rivero, R., & Sønsteby, A. (2020). Temperature control of shoot growth and floral initiation in apple (*Malus× domestica* Borkh.). *CABI Agriculture and Bioscience*, 1(1), 8.
- Herrera, S., Cardoso, R. M., Soares, P. M., Espírito-Santo, F., Viterbo, P., & Gutiérrez, J. M. (2019). Iberia01: a new gridded dataset of daily precipitation and temperatures over Iberia. *Earth System Science Data*, 11(4), 1947–1956. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1947-2019>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hofstra, G., & Hesketh, J. D. (1969). The effect of temperature on stomatal aperture in different species. In *Can. J. Bot* (Vol. 47).
- Huglin, M. P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole [Climatologie]. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 64(26), 1117–1126.
- Irmak, S., & Haman, D. Z. (2003). Evapotranspiration: Potential or Reference? *ABE 343/AE256*, 6/2003. EDIS, 2003(14).
- Janssen, P. H. M., & Heuberger, P. S. C. (1995). Calibration of process-oriented models. *Ecological Modelling*, 83(1–2), 55–66. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00084-9](https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00084-9)
- Jin, Z.-Q., & Zhu, D.-W. (2008). Impacts of changes in climate and its variability on food production in Northeast China. *Acta Agronomica Sinica*, 34(9), 1588–1597.
- Kalisz, A. (2012). Growth and earliness of Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *chinensis*) as a function of time and weather conditions *Folia Horticulturae*. 23 (2) 131-138,
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), 1–20.
- Karger, D. N., Schmatz, D. R., Dettling, G., & Zimmermann, N. E. (2020). High-resolution monthly precipitation and temperature time series from 2006 to 2100. *Scientific Data*, 7(1), 248.
- Kim, K.-H., Doi, Y., Ramankutty, N., & Iizumi, T. (2021). A review of global gridded cropping system data products. *Environmental Research Letters*, 16(9), 093005.
- Kriticos, D. J., Jarošik, V., & Ota, N. (2014). Extending the suite of BIOCLIM variables: a proposed registry system and case study using principal components analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(9), 956–960.

- Kriticos, D. J., Webber, B. L., Leriche, A., Ota, N., Macadam, I., Bathols, J., & Scott, J. K. (2012). CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(1), 53–64.
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Legave, J.-M., Blanke, M., Christen, D., Giovannini, D., Mathieu, V., & Oger, R. (2013). A comprehensive overview of the spatial and temporal variability of apple bud dormancy release and blooming phenology in Western Europe. *International Journal of Biometeorology*, 57(2), 317–331. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0551-9>
- Liberti, L., Lavor, C., Maculan, N., & Mucherino, A. (2014). *Euclidean distance geometry and applications*. *SIAM Review*, 56(1), 3–69. <https://doi.org/10.1137/120875909>:
- Lima-Ribeiro, M. S., Varela, S., González-Hernández, J., De Oliveira, G., Diniz-Filho, J. A. F., & Terribile, L. C. (2015). EcoClimate: a database of climate data from multiple models for past, present, and future for macroecologists and biogeographers. *Biodiversity Informatics*, 10.
- Lionello, P., et al. (2006). The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 4, 1–26.
- Lionello, P., Özsoy, E., Planton, S., & Zanchetta, G. (2017). Climate variability and change in the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 151, 1–3.
- Liu, M., Lei, H., Wang, X., & Paredes, P. (2025). High-resolution mapping of evapotranspiration over heterogeneous cropland affected by soil salinity. *Agricultural Water Management*, 308, 109301.
- Lizaso, J. I., Ruiz-Ramos, M., Rodríguez, L., Gabaldon-Leal, C., Oliveira, J. A., Lorite, I. J., Sánchez, D., García, E., Rodríguez, A., Domínguez, I. P., Egea-Cortines, M., & Ruiz, J. (2018). Impact of high temperatures in maize: Phenology and yield components. *Field Crops Research*, 216, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.013>
- Luedeling, Eike & Semenov, Mikhail & Brown, Patrick. (2011). Climate Change Affects Winter Chill for Temperate Fruit and Nut Trees. *PloS one*. 6. e20155. [10.1371/journal.pone.0020155](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020155).
- Luedeling, E., Zhang, M., & Girvetz, E. H. (2009). Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950–2099. *PLoS ONE*, 4(7), e6166. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006166>
- MacHardy, W. E. (1996). *Apple scab: Biology, epidemiology, and management*. APS Press.
- Malheiro, A. C., Campos, R., Fraga, H., Eiras-Dias, J., Silvestre, J., & Santos, J. A. (2013). Winegrape phenology and temperature relationships in the Lisbon wine region, Portugal. *OENO One*, 47(4), 287–299.

- Malhotra, S. K. (2017). Horticultural crops and climate change: A review. In *Indian Journal of Agricultural Sciences* 87(1) 12–22. Indian Council of Agricultural Research.
<https://doi.org/10.56093/ijas.v87i1.67138>
- Marchiori, J. N. C. (2000). *Dendrologia das angiospermas: das bixáceas às rosáceas*. Editora UFSM. ISBN: 978 8573910230. 240 p.
- Massano, L. T., Bois, B., Adrian, M., Fosser, G., & Gaetani, M. (2025). The use of ecoclimatic indices to investigate climate impact on wine grape yield at local scale. *European Journal of Agronomy*, 171, 127790.
- Martins, D. S., Paredes, P., Razinei, T., Pires, C., Cadima, J., & Pereira, L. S. (2017a). Assessing reference evapotranspiration estimation from reanalysis weather products. An application to the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2378–2397.
<https://doi.org/10.1002/joc.4852>
- Massano, L., Fosser, G., Gaetani, M., & Bois, B. (2023). Assessment of climate impact on grape productivity: A new application for bioclimatic indices in Italy. *Science of the Total Environment*, 905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167134>
- Mekonnen Weldegerima, T., Birhanu, S., & Zeleke, T. T. (2023). Zoning and agro-climatic characterization of hotspots in the Tana-Beles Sub-Basin-Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research* 19(4), 455–465. <https://doi.org/10.5897/AJAR2021.15613>
- Melgarejo, P., & Salazar, D. M. (2000). *Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas vol. I. El Medio Ecológico, La Higuera, El Alcaparro y El Nopal*. Mundi-Prensa y AMV Ediciones. Madrid, 3, 82.
- Moriondo, M., Bindi, M., Fagarazzi, C., Ferrise, R., & Trombi, G. (2011). Framework for high-resolution climate change impact assessment on grapevines at a regional scale. *Regional Environmental Change*, 11, 553–567.
- McMaster, G.S., Wilhelm, W.W., 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agr For Meteorol* 87:291–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., & Akbari, M. (2020). GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106646>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., & Feyen, L. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*, 45(7), 3285–3296.
- Noce, S., Caporaso, L., & Santini, M. (2020). A new global dataset of bioclimatic indicators. *Scientific Data*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00726-5>
- Noreldin, T., Ouda, S., & Amer, A. (2016). Agro-climatic zoning in Egypt to improve irrigation water management. *Journal of Water and Land Development*, 31(1), 113.

- O'Donnel, M. S., & Ignizio, D. A. (2012). Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States. US Geological Survey.
- Ometto, J. C. (1981). Bioclimatologia vegetal. Sao Paulo: AGRONOMICA CERES, Versão1756211618029502464
- Ognjanov, V., Cerović, R., Ljubojević, M., Radović, D., & Bijelić, S. (2023). Agroclimatic requirements of traditional European pear (*Pyrus communis* L.) cultivars. *Agronomy*, 13(2), 518. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020518>
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- Paredes, P., Martins, D. S., Pereira, L. S., Cadima, J., & Pires, C. (2018). Accuracy of daily estimation of grass reference evapotranspiration using ERA-Interim reanalysis products with assessment of alternative bias correction schemes. *Agricultural Water Management*, 210, 340–353.
- Paredes, P., Pereira, L. S., Almorox, J., & Darouich, H. (2020). Reference grass evapotranspiration with reduced data sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith temperature approach and the Hargeaves-Samani equation using local climatic variables. *Agricultural Water Management*, 240, 106210.
- Paredes, P., Trigo, I., de Bruin, H., Simões, N., & Pereira, L. S. (2021). Daily grass reference evapotranspiration with Meteosat Second Generation shortwave radiation and reference ET products. *Agricultural Water Management*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106543>
- Pelosi, A. (2023). Performance of the Copernicus European Regional Reanalysis (CERRA) dataset as proxy of ground-based agrometeorological data. *Agricultural Water Management*, 289, 108556.
- Pelosi, A., Terribile, F., D'Urso, G., & Chirico, G. B. (2020). Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX reanalysis data with spatially interpolated weather observations for the regional assessment of reference evapotranspiration. *Water*, 12(6), 1669.
- Pereira, L.S.; Allen, R.; Paredes, P.; López-Urrea, R.; Raes, D.; Smith, M.; Kilic, A.; Salman, M. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements; FAO Irrigation and Drainage Paper 56rev; FAO: Rome, Italy, 2025; p. 395. (in press)
- Pérez-Cutillas, P., Cataldo, M. F., Zema, D. A., de-Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2018). Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. *Cuenca del Taibilla (SE de España). Bosque (Valdivia)*, 39(1), 119–129.
- Pérez-Pastor, A., et al. (2023). Assessment of chilling requirement and threshold temperature of a low-chill pear (*Pyrus communis* L.) germplasm in the Mediterranean area. *Agronomy*, 13(2), 518. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020518>

- Pérez-Pastor, A., et al. (2014). Effects of regulated deficit irrigation on early-maturing peach tree performance. *Agricultural Water Management*, 133, 72–82.
- Piña-Rey, A., González-Fernández, E., Fernández-González, M., Lorenzo, M. N., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2020). Climate change impacts assessment on wine-growing bioclimatic transition areas. *Agriculture*, 10(12), 605.
- Ramos, T. B., Horta, A., Gonçalves, M. C., Pires, F. P., Duffy, D., & Martins, J. C. (2017). The INFOSOLO database as a first step towards the development of a soil information system in Portugal. *Catena*, 158, 390–412. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.020>
- Rasera, J. B., Silva, R. F. da, Piedade, S., Mourão Filho, F. de A. A., Delbem, A. C. B., Saraiva, A. M., Sentelhas, P. C., & Marques, P. A. A. (2023). Do Gridded Weather Datasets Provide High-Quality Data for Agroclimatic Research in Citrus Production in Brazil? *AgriEngineering*, 5(2), 924–940.
- Ray, D. K., West, P. C., Clark, M., Gerber, J. S., Prishchepov, A. V., & Chatterjee, S. (2019). Climate change has likely already affected global food production. *PLoS ONE*, 14(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148>
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2), 34.
- Reddy, S. J. (1983). Agroclimatic classification of the semi-arid tropics I. A method for the computation of classificatory variables. *Agricultural Meteorology*, 30(3), 185–200.
- FAO (1996). AGRO-ECOLOGICAL ZONING Guidelines. Soil Resources, Management and Conservation Service FAO Soils Bulletin 73. Rome
- Rew, R., Davis, G., Emmerson, S., & Davies, H. (1996). NetCDF User's Guide An Interface for Data Access.
- Rocca Da Cunha, G., Pasinato, A., Barrocas, M., Pimentel, M., Carlos, J., Jaime, H., Tavares, R., João, M., Fernandes, L., Genei, P., Dalmago, A., & Santi, A. (2011). Regiões para trigo no Brasil: ensaios de VCU, zoneamento agrícola e época de semeadura. In: Pires, J. L. F.; Vargas, L.; Cunha, G. R. (Ed.). *Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, pp. 27-40. Rever os apelidos dos autores
- Rolim, J., Catalão, J., & Teixeira, J. (2011). The influence of different methods of interpolating spatial meteorological data on calculated irrigation requirements. *Applied Engineering in Agriculture*, 27(6), 979-989.
- Rolim, J., Teixeira, J. L., Catalão, J., & Shahidian, S. (2017). The impacts of climate change on irrigated agriculture in Southern Portugal. *Irrigation and Drainage*, 66(1), 3–18.
- Rosado, F. (2001). Um olhar sobre a estatística. In P. Oliveira & E. Athayde (Eds.), *Actas do VII Congresso Anual da Sociedade Portuguesa de Estatística: Vol. Estatística* (pp. xx–xx). Sociedade Portuguesa de Estatística (SPE).
- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2015). Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop

- evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, 103–115.
- Sánchez-Capuchino, J. A. (1967). Contribución al conocimiento de necesidades en frío invernal de variedades frutícolas. *Levante Agrícola*, 61, 26–28.
- Schlenker, W., & Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37), 15594–15598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Seo, S. N. (2011). A geographically scaled analysis of adaptation to climate change with spatial models using agricultural systems in Africa. *The Journal of Agricultural Science*, 149(4), 437–449.
- Seo, S. N. (2014). Evaluation of the Agro-Ecological Zone methods for the study of climate change with micro farming decisions in sub-Saharan Africa. *European Journal of Agronomy*, 52, 157–165.
- Sim, H. S., Jo, W. J., Lee, H. J., Moon, Y. H., Woo, U. J., Jung, S. Bin, Ahn, S. R., & Kyeomkim, S. (2021). Determination of Optimal Growing Degree Days and Cultivars of Kimchi Cabbage for Growth and Yield during Spring Cultivation under Shading Conditions. *Horticultural Science and Technology*, 39(6), 714–725. <https://doi.org/10.7235/HORT.20210063>
- Sousa, M. L., Gonçalves, M., Fialho, D., Ramos, A., Lopes, J. P., Oliveira, C. M., & De Melo-Abreu, J. P. (2022). Apple and pear model for optimal production and fruit grade in a changing environment. *Horticulturae*, 8(10), 873.
- Slack, D. C., Fox Jr, F. A., Martin, E. C., & Clark, L. J. (1994). Growing degree days based crop coefficients for irrigation management. *Proceeding of the IV National Congress of the American Association of Agricultural Engineers*, 7–13.
- Smith, M., 1993. CLIMWAT for CROPWAT: A climatic database for irrigation planning and management. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 49*, Rome. (CLIMWAT 2.0). <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/en/> (acedido em 24 Julho 2025)
- Snyder, R. L. (1985). Hand calculating degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35(1–4), 353–358.
- Soares, D., Paredes, P., Paço, T. A., & Rolim, J. (2025). Projected Bioclimatic Changes in Portugal: Assessing Maize Future Suitability. *Agronomy*, 15(3).
- Stanley, C. J., Tustin, D. S., Lupton, G. B., McCartney, S., Cashmore, W. M., & De Silva, H. N. (2000). Towards understanding the role of temperature in apple fruit growth responses in three geographical regions within New Zealand. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 75(4), 413–422. <https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511261>
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D., 2012. *Crop Yield Response to Water*. *FAO Irrig Drain Paper No. 66*. *FAO*, Rome, 500p.

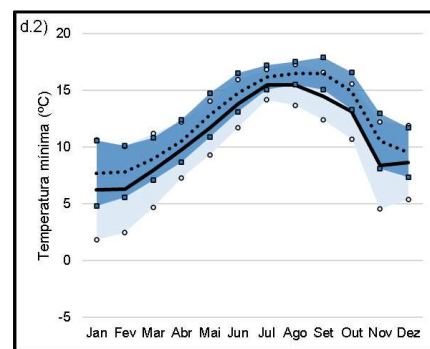
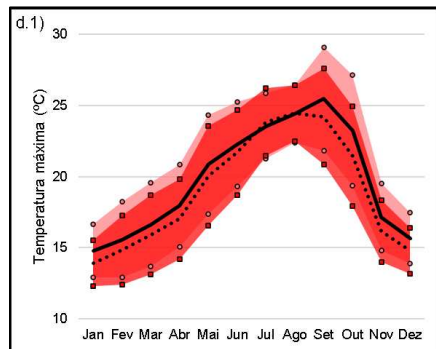
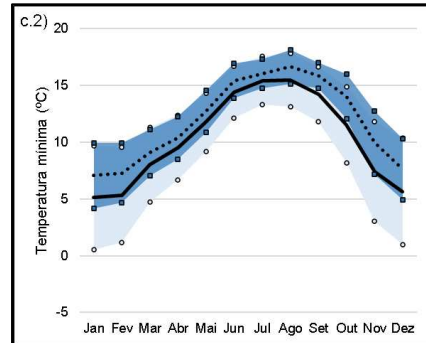
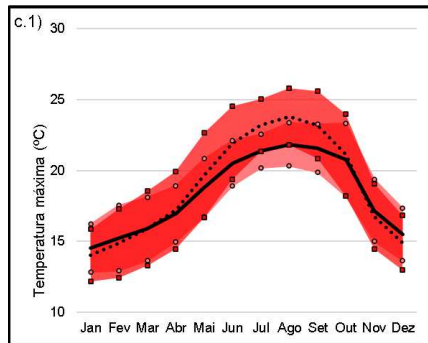
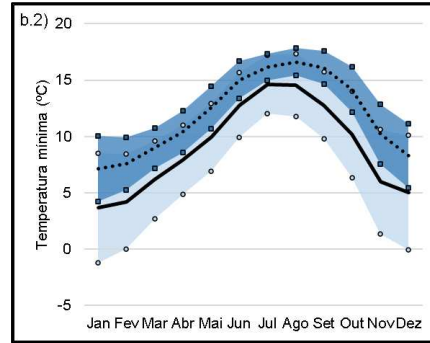
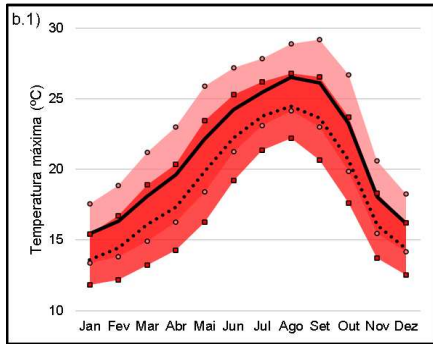
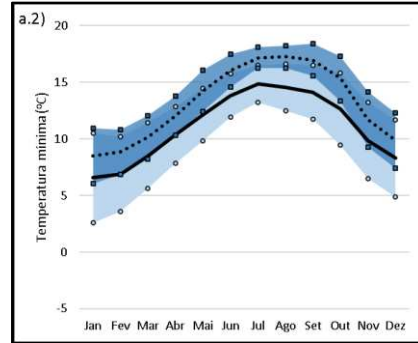
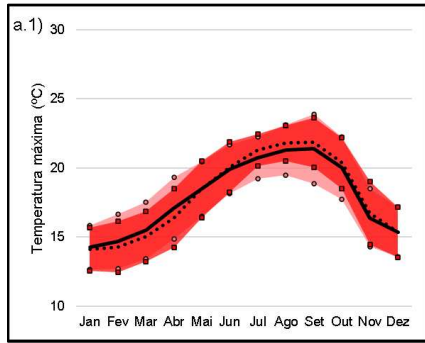
- Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L. S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 144, 54–68.
- Teixeira, J.L. and Rolim, J., 2014. Impacte das alterações climáticas nos sistemas de regadio no Alentejo. ISAPress, 150p.
- Tegos, A., Stefanidis, S., Cody, J., & Koutsoyiannis, D. (2023). On the sensitivity of standardized-precipitation-evapotranspiration and aridity indexes using alternative potential evapotranspiration models. *Hydrology*, 10(3), 64.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94.
- Title, P. O., & Bemmels, J. B. (2018). ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. *Ecography*, 41(2), 291–307.
- Todorovic, M., & Steduto, P. (2003). A GIS for irrigation management. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(4–5), 163–174. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(03\)00023-8](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00023-8)
- Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1–2), 81–97.
- Uniyal, B., Dietrich, J., Vu, N. Q., Jha, M. K., & Arumí, J. L. (2019). Simulation of regional irrigation requirement with SWAT in different agro-climatic zones driven by observed climate and two reanalysis datasets. *Science of the Total Environment*, 649, 846–865.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (1997). *World atlas of desertification* (2nd ed.). London: Arnold; New York: John Wiley. 182 p. ISBN: 0340691662.
- Van Wart, J., van Bussel, L. G. J., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N. D., & Claessens, L. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research*, 143, 44–55.
- Vanella, D., Longo-Minnolo, G., Belfiore, O. R., Ramírez-Cuesta, J. M., Pappalardo, S., Consoli, S., D'Urso, G., Chirico, G. B., Coppola, A., & Comegna, A. (2022). Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101182.
- Vega, G., Pertierra, L. R., & Olalla-Tárraga, M. Á. (2017). MERRAclim, a high-resolution global dataset of remotely sensed bioclimatic variables for ecological modelling. *Scientific Data*, 4(1), 1–12.
- Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60–69. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.09.005>
- Vrieling, A., De Leeuw, J., & Said, M. Y. (2013). Length of growing period over Africa: Variability and trends from 30 years of NDVI time series. *Remote Sensing*, 5(2), 982–1000.

- Warrington, I. J., Fulton, T. A., Halligan, E. A., & De Silva, H. N. (1999). Apple fruit growth and maturity are affected by early season temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124(5), 468–477. <https://doi.org/10.21273/jashs.124.5.468>
- Webber, H., Ewert, F., Olesen, J. E., Müller, C., Fronzek, S., Ruane, A. C., Bourgault, M., Martre, P., Ababaei, B., Bindi, M., Ferrise, R., Finger, R., Fodor, N., Gabaldon-Leal, C., Gaiser, T., Jabloun, M., Kersebaum, K. C., Lizaso, J. I., Lorite, I. J., ... Asseng, S. (2018). Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature Communications*, 9, 4249. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2>
- Wen, M., Cheng, D., Song, J., Zhang, G., Lai, W., & Jiang, W. (2018). Impacts of climate change on aridity index and its spatiotemporal variation in the Loess Plateau of China, from 1961 to 2014. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1–12.
- Yamada, E. S. M., & Sentelhas, P. C. (2014). Agro-climatic zoning of *Jatropha curcas* as a subside for crop planning and implementation in Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 58, 1995–2010.
- Yang, Y. Z., Feng, Z. M., Huang, H. Q., & Lin, Y. (2008). Climate-induced changes in crop water balance during 1960-2001 in Northwest China. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 127(1–2), 107–118.
- Zavala, C. A. S., & Lluch-Cota, D. B. (1998). La aridez en el Noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmósfera*, 11(1), 29–44.
- Zhang, C., et al. (2024). Chilling and heat requirements of pear cultivars in China: Implications for adaptation to climate change. *Frontiers in Plant Science*, 15, 11082341. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.11082341>
- Zhu, Z., Huang, H., Meng, T., Wang, J., Zhu, Q., Xu, Y., & Zhang, Y. (2023). Effects of Meteorological Factors on Apple Yield Based on Multilinear Regression Analysis: A Case Study of Yantai Area, China. *Atmosphere*, 14(1), 183. <https://doi.org/10.3390/atmos14010183>

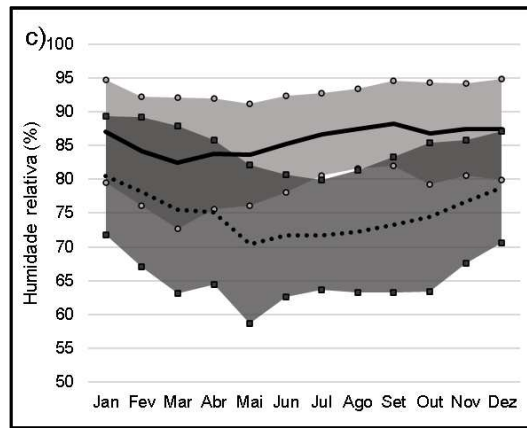
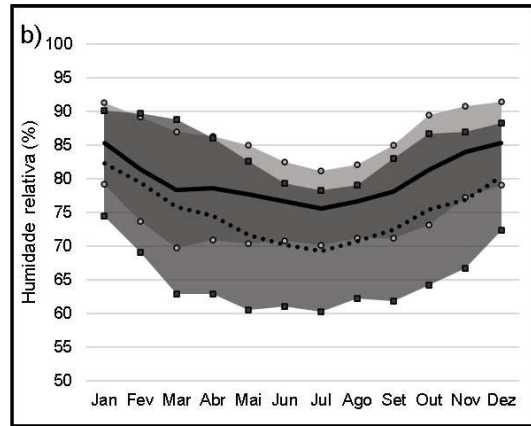
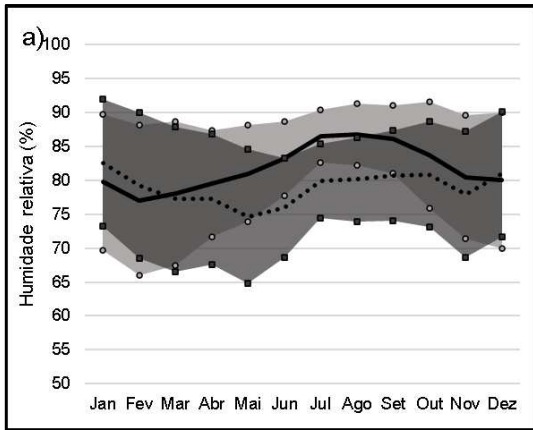
6)Anexos

Anexo 1 - Fonte dos dados climáticos, as variáveis disponíveis e número de registos

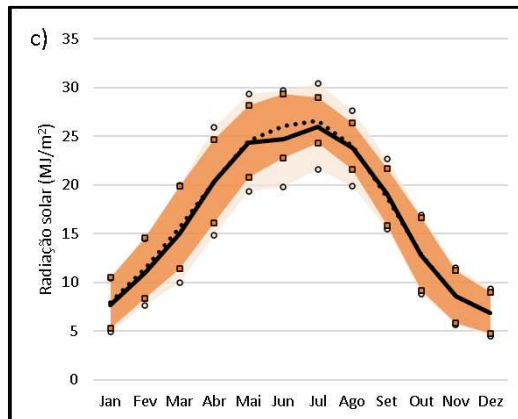
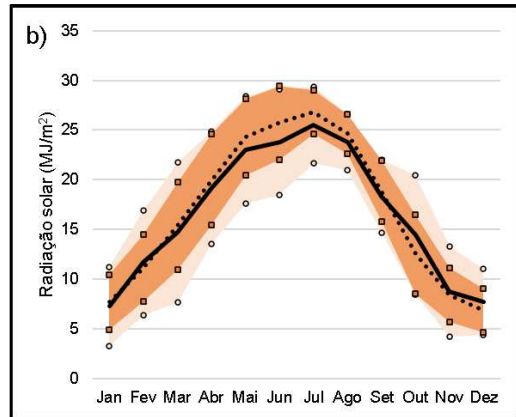
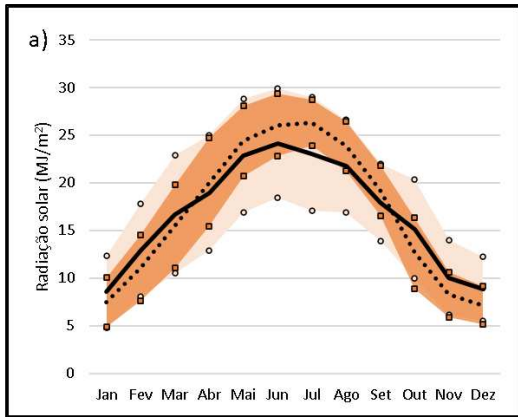
		Estações Meteorológicas					
		Cela	São Pedro de Moel	Fruticultura Vieira Natividade	Aljubarrota	Alfeizerão	
Fontes	IPMA			X	X		
	COTHN		X				
	SNIRH	X				X	X
Coordenadas	Latitude (°N)	39,573	39,5	39,7634	39,5481	39,561	39,498
	Longitude (°E)	-9,068	-9,02	-9,03	-8,97	-8,92	-9,10
	Altitude (m)	2	3	32,52	35,77	141	13
Dados	Número de registos	45181	24576	20200	47660	11011	23932
	Períodos	1984-2023	2014-2023	2010-2023	1999-2023	1983-2021	1984-2023
Variáveis	Temperatura Máxima (Nº de registos)	6815	4096	3899	8759		
	Temperatura mínima (Nº de registos)	6815	4096	3822	8765		
	Humidade relativa média (Nº de registos)	6673	4096	4113	6806		
	Radiação solar (Nº de registos)	5577	4096	3606	7404		
	Velocidade do vento (Nº de registos)	6815	4096	2051	7904		
	Precipitação (Nº de registos)	12486	4096	2709	8022	11011	23932



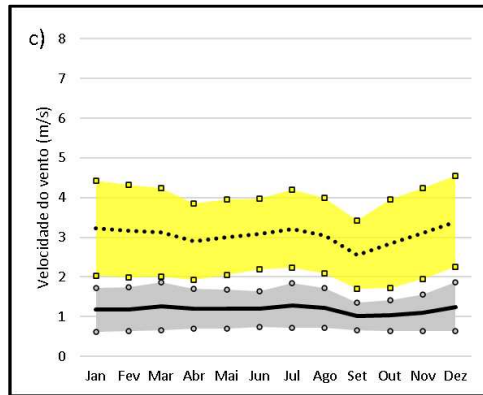
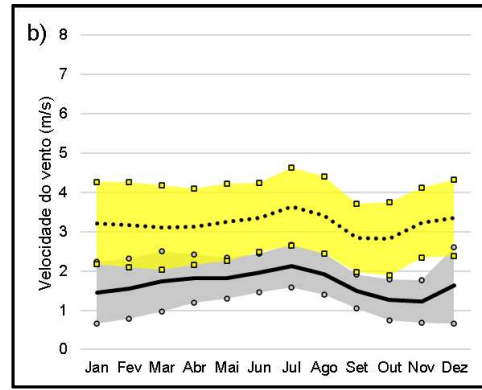
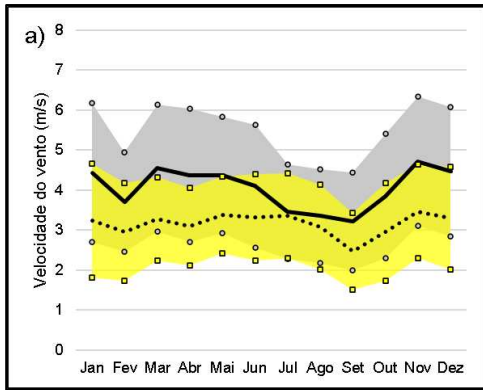
Anexo 2 - Valores médios Obs (—) e Rean (.....) com desvio padrão de Obs (○;◻) e de Rean (◻;◻) após a remoção dos outliers nas variáveis temperatura máxima (1) e mínima (2) nas estações a) SPM, b) FVN, c) Cella – SNIRH, d) Cella – COTHN.



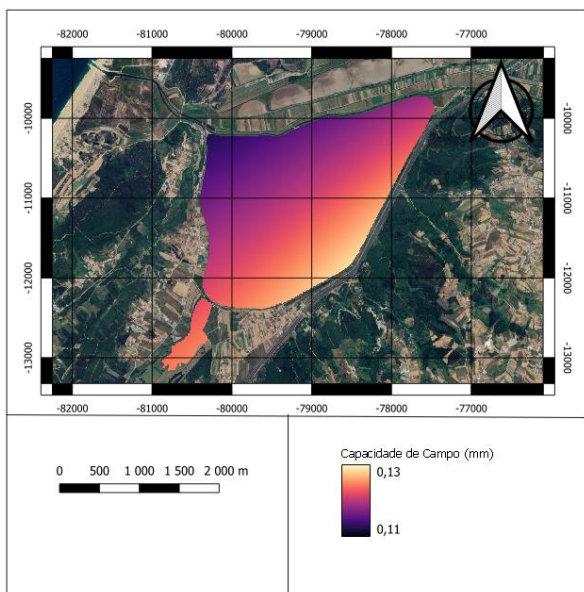
Anexo 3 - Médias mensais da humidade relativa dos dados Obs (—) e de Rean (.....) com o desvio padrão de Obs (○) e de Rean (□) após a remoção dos outliers, para as estações a) SPM, b) FVN, c) Cela - SNIRH e d) Cela - COTHN.



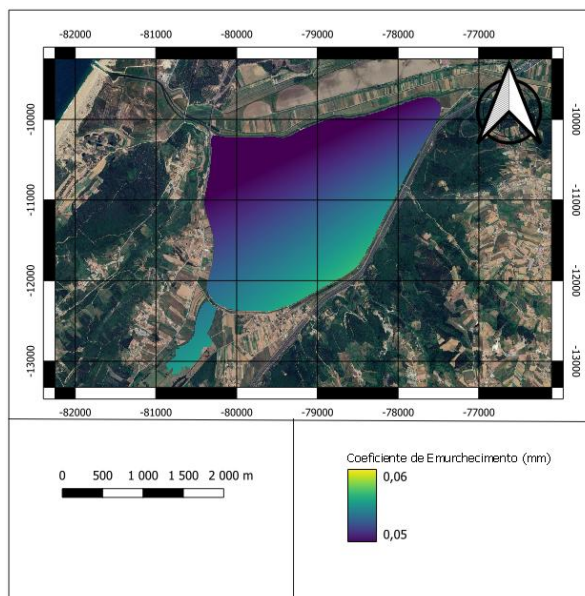
Anexo 4 - Médias mensais da radiação solar dos dados Obs (—) e de Rean (.....) com o desvio padrão de Obs (○) e de Rean (■) após a remoção dos outliers, para as estações a) SPM, b) FVN e c) Cela – SNIRH.



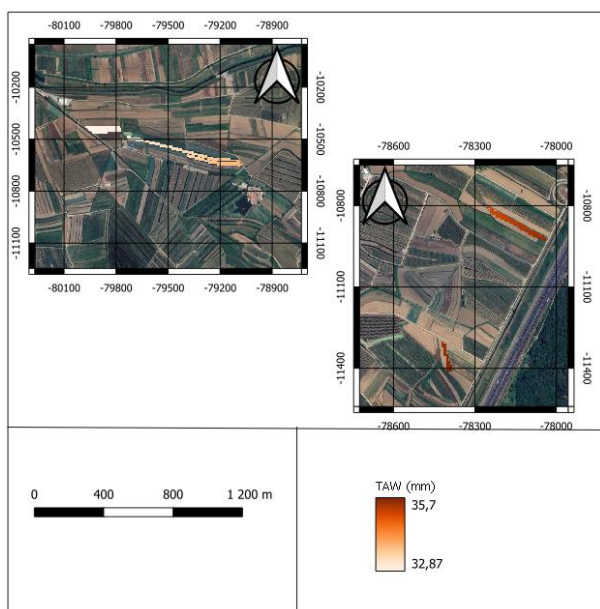
Anexo 5 - Médias mensais da velocidade do vento dos dados Obs (—) e de Rean (.....) com o desvio padrão de Obs(●) e de Rean (■) após a remoção dos outliers, para as estações a) SPM, b) FVN, c) Cela - SNIRH e d) Cela - COTHN.



Anexo 4 – Interpolação espacial no AHC com o teor de água no solo à capacidade de campo



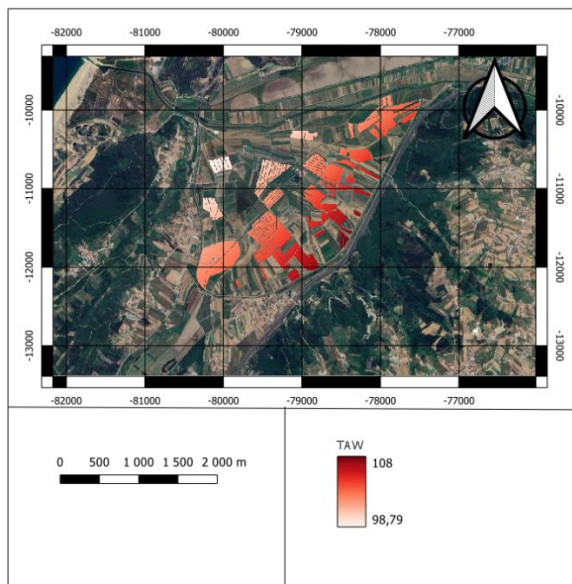
Anexo 5 - Interpolação espacial no AHC com o teor de água no solo ao coeficiente de emurchecimento



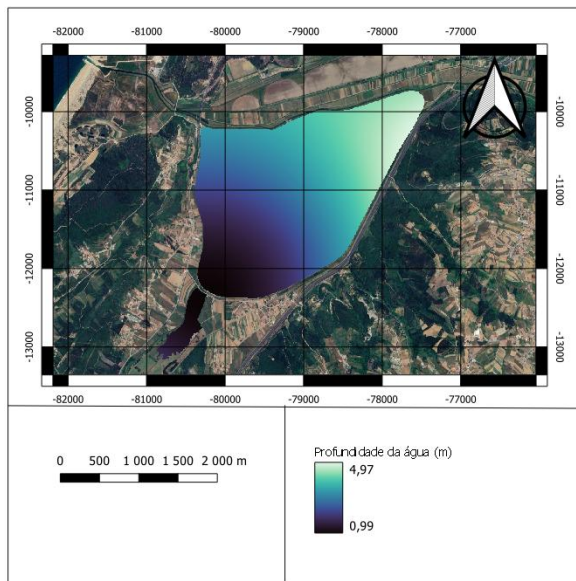
Anexo 6 - Interpolação espacial no AHC com os dados da TAW na cultura da batata



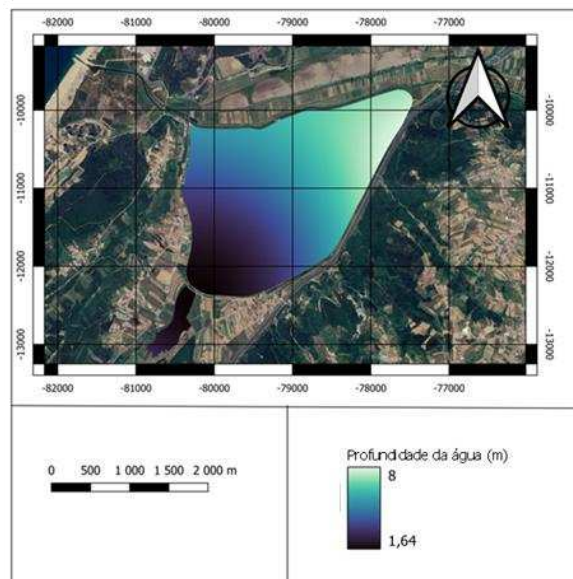
Anexo 7 - Interpolação espacial no AHC com os dados da TAW na cultura da couve



Anexo 8 - Interpolação Geoespacial no AHC com os dados da TAW da cultura da maçã e para a Pêra



Anexo 9 - Interpolação geoespacial no AHC com dados da profundidade de água de março.



Anexo 10- Interpolação geoespacial no AHC com dados da profundidade de água de agosto.