

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Mudanças climáticas e suas implicações na irrigação da cultura do
milho (*Zea mays* L.) em Portugal Continental**

Nicolas Gustavo da Cruz da Silva

Trabalho de conclusão de curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

**Piracicaba
2025**

Nicolas Gustavo da Cruz da Silva

Mudanças climáticas e suas implicações na irrigação da cultura do milho (*Zea mays* L.) em Portugal Continental

Orientador:
Prof. Dr. **DEOCLECIO JARDIM AMORIM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

**Piracicaba
2025**

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	5
1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivo geral	9
1.2 Objetivos específicos	10
2 DESENVOLVIMENTO	11
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1.1 A cultura do Milho e o Clima Mediterrânico	11
2.1.2 Alterações climáticas e Cenários RCP	11
2.1.3 Modelação da Evapotranspiração e Necessidade de Rega	12
2.1.4 Capacidade de Armazenamento de Água no Solo	14
2.1.5 Geoprocessamento e Análise Espacial na Agricultura	14
3 MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Área de estudo e fonte de dados climáticos	15
3.2 Pré-processamento e tratamento dos dados	15
3.2.1 Variáveis meteorológicas e pré-processamento	16
3.2.1 Temperatura do ar	16
3.2.2 Radiação solar e onda curta (Rs)	17
3.2.3 Umidade atmosférica e défice de pressão de vapor	17
3.2.4 Velocidade do vento	18
3.2.4 Precipitação	19
3.3 Cálculo da Evapotranspiração de Referência	19
3.4 Caracterização da cultura e capacidade de armazenamento de água do solo	20
3.5 Cálculo da necessidade de rega	21
3.6 Definição das classes de aptidão agrícola	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Caracterização das condicionantes edafoclimáticas	23
4.1.1 Capacidade de armazenamento de água no solo (TAW)	23
4.1.2 Tendências evolutivas da temperatura e precipitação	25
4.1.3 Tendências evolutivas da evapotranspiração de referência	31
4.1.4 Necessidade de irrigação e aptidão agrícola	35
3 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS	39

RESUMO

Mudanças climáticas e suas implicações na irrigação da cultura do milho (*Zea mays* L.) em Portugal Continental

As alterações climáticas representam um desafio crítico para a agricultura irrigada na região Mediterrânica. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas na Necessidade de Rega (NR) e na Aptidão Agrícola da cultura do milho (*Zea mays* L.) em Portugal Continental. A metodologia baseou-se na simulação do balanço hídrico sequencial diário, utilizando dados climáticos do projeto CORDEX para o período histórico (1980-2005) e projeções futuras (2011-2100) sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. A Evapotranspiração de Referência (ET_o) foi estimada pelo método de Hargreaves-Samani e a capacidade de água no solo (TAW) mapeada via funções de pedotransferência (SoilGrids). Os resultados indicam um aumento generalizado da ET_o e uma redução da precipitação na primavera, resultando num agravamento severo do défice hídrico. No cenário RCP 8.5 (final do século), projeta-se uma expansão das zonas de inaptidão ($NR > 550$ mm) abrangendo grande parte do Alentejo e Interior Centro, com o gradiente de aptidão a deslocar-se para Norte. Conclui-se que a viabilidade da cultura do milho exigirá volumes de água insustentáveis no Sul do país, sugerindo a necessidade urgente de estratégias de adaptação ou reconversão cultural.

Palavras-chave: Alterações Climáticas, Balanço Hídrico, Milho, CORDEX, Aptidão Agrícola.

ABSTRACT

Climate Change and Its Implications for the Irrigation of Maize (*Zea mays* L.) Cultivation in Mainland Portugal

Climate change poses a critical challenge to irrigated agriculture in the Mediterranean region. This study aimed to evaluate the impacts of climate change on Irrigation Requirements (IR) and Agricultural Aptitude for maize (*Zea mays* L.) in Continental Portugal. The methodology was based on a daily sequential water balance simulation, using climate data from the CORDEX project for the historical period (1980-2005) and future projections (2011-2100) under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. Reference Evapotranspiration (ET_0) was estimated using the Hargreaves-Samani method, and Total Available Water (TAW) was mapped using pedotransfer functions (SoilGrids). The results indicate a generalized increase in ET_0 and a reduction in spring precipitation, leading to a severe aggravation of the water deficit. Under the RCP 8.5 scenario (end of the century), an expansion of unsuitable zones ($IR > 550$ mm) is projected, covering large parts of Alentejo and the Central Interior, with the aptitude gradient shifting Northwards. It is concluded that maize viability will require unsustainable water volumes in the South, suggesting an urgent need for adaptation strategies or crop reconversion.

Keywords: Climate Change. Water Balance. Maize. CORDEX. Agricultural Aptitude.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Precipitação média mensal por normais climatológicas de 30 anos no período de 1931 a 2019	8
Figura 2 – Distribuição das áreas declaradas de cereais e oleaginosas em Portugal Continental no ano de 2024	9
Figura 3 – Representação esquemática da variação dos coeficientes de cultura simples durante o desenvolvimento de uma planta	14
Figura 4 – Efeito de borda. A) Região branca destacando a falha de preenchimento de pixels. B) Mapa após o preenchimento espacial por vizinhança	20
Figura 5 – Distribuição espacial da Capacidade de Água Disponível (TAW) em Portugal Continental	24
Figura 6 – Evolução espacial da temperatura média do ar (°C) durante o período de crescimento do milho (abril-outubro) em Portugal Continental, para o período histórico (1971-2000) e cenários futuros (2011-2100), considerando os cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5	26
Figura 7 – Distribuição espaciotemporal da precipitação acumulada durante a estação de crescimento do milho (abril a outubro) em Portugal Continental: comparação entre a climatologia histórica (1971-2000) e projeções futuras (2011-2100) sob cenários RCP 4.5 e RCP 8.5	28
Figura 8 – Redução percentual da precipitação acumulada no período de crescimento do milho (abril-outubro) no final do século (2071-2100), comparativamente ao período histórico (1971-2000), separada por distrito em Portugal Continental, considerando os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5	30
Figura 9 – Análise de correlação entre a ET_o média anual estimada pelo método Hargreaves-Samani e o método padrão FAO-56 Penman-Monteith para Portugal Continental (média do período 1980-2005)	31
Figura 10 – Distribuição espaciotemporal da Evapotranspiração de Referência (ET_o) acumulada durante a estação de crescimento (abril a outubro) em Portugal Continental. Comparação entre o período histórico (1980-2005) e as projeções futuras (2011-2100) sob os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5	32
Figura 11 – Distribuição espacial da Necessidade Líquida de Rega (NRL) acumulada durante o ciclo cultural do milho (maio a setembro) em Portugal Continental. Comparação entre a climatologia histórica (1980-2005) e as projeções para o final do século (2071-2100) sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5	35
Figura 12 – Distribuição espacial das classes de aptidão agrícola para a cultura do milho irrigado em Portugal Continental, baseada na Necessidade de Rega (NR)	35

1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas é um desafio complexo e transversal com impacto direto sobre os sistemas de produção de alimentos. A região do Mediterrâneo é classificada pelo Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC, 2021) como um *hotspot* climático, ou seja, uma das zonas do globo mais suscetíveis ao aquecimento e à variação dos padrões de precipitação. As projeções para o final do século XXI indicam um aumento da temperatura média do ar que poderá oscilar entre 2°C, no cenário de emissões intermédias (RCP 4.5), e 4°C no cenário de emissões elevadas (RCP 8.5). Para Portugal Continental, prevê-se uma redução significativa da precipitação anual, que poderá atingir os 30% nas regiões do Sul, agravada por uma alteração na sua distribuição sazonal e por um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, como ondas de calor e secas prolongadas (FRAGA et al., 2016a).

Estes novos cenários climáticos colocam desafios sobre a agricultura com irrigação. A alteração dos padrões térmicos e pluviométricos afeta diretamente o balanço hídrico do solo, aumentando a evapotranspiração potencial e reduzindo a disponibilidade de água para as culturas. Neste cenário, a cultura do milho (*Zea mays* L.) assume uma posição de particular vulnerabilidade, pois sendo uma cultura de primavera-verão, o seu ciclo vegetativo coincide com o período de maior défice hídrico em Portugal (maio a setembro), tornando-a altamente dependente da irrigação artificial (Figura 1).

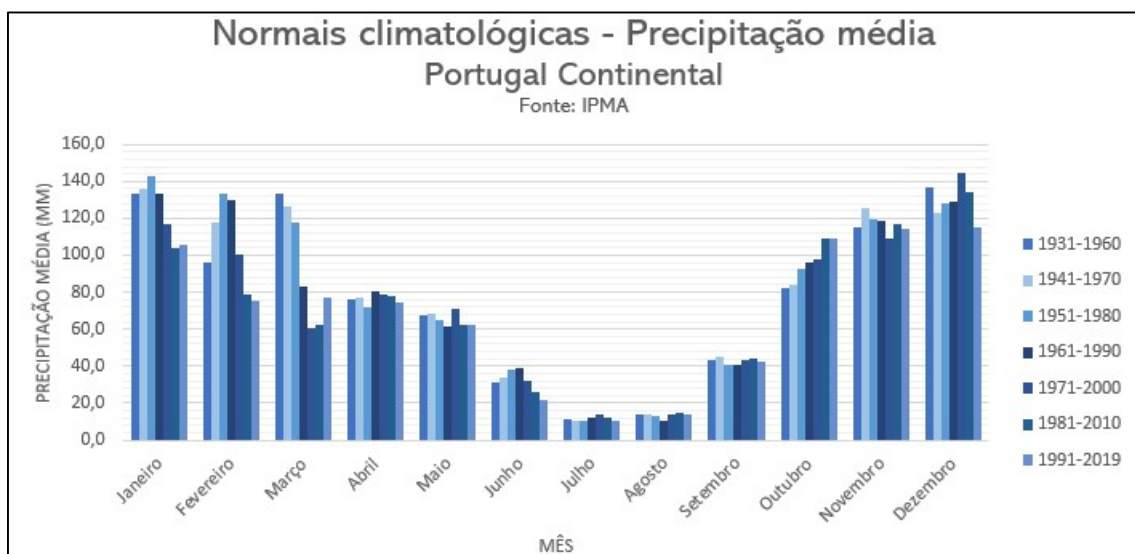


Figura 1 - Precipitação média mensal por normais climatológicas de 30 anos no período de 1931 a 2019.

Fonte: Instituto Português de Mar e Atmosfera (acessado em 2025).

De acordo com dados da Associação Nacional dos Produtores de Milho e Sorgo (ANPROMIS, 2025), a cultura do milho ocupava, em 2024, cerca de 86.860 hectares, sendo que aproximadamente 84% desta área cultivada em sistema de rega, o que evidencia uma impossibilidade técnica e econômica de produzir milho grão em regime de sequeiro na maior parte do território (Figura 2). O milho possui uma importância estratégica para o país devido à versatilidade de uso, sendo fundamental tanto para a alimentação animal quanto para a crescente produção de bioenergia. Portanto, qualquer redução à viabilidade produtiva do milho repercute-se por toda a cadeia agroalimentar nacional, aumentando a dependência externa do país em cereais.

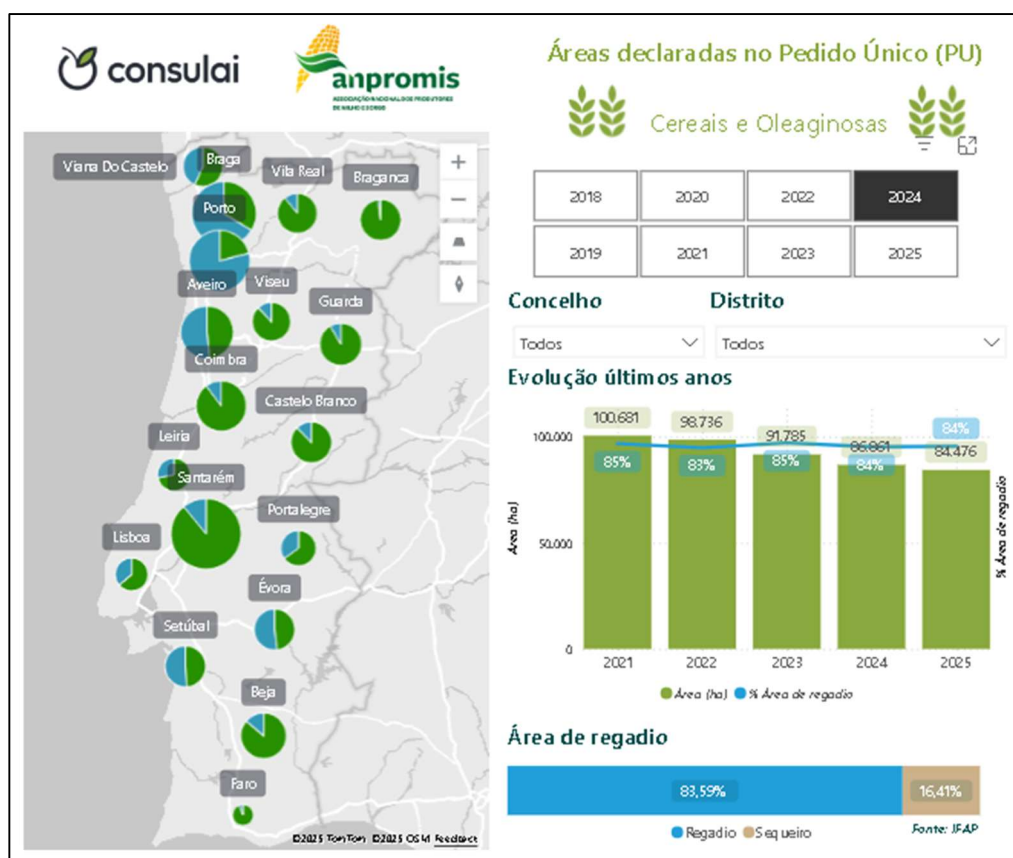


Figura 2 - Distribuição das áreas declaradas de cereais e oleaginosas em Portugal Continental no ano de 2024. O painel apresenta a distribuição geográfica entre regime de irrigação (verde) e sequeiro (azul) por distrito, a evolução histórica da área total e da percentagem de rega (2021-2025), e destaca a forte predominância da rega (83,59%) na produção nacional.

Fonte: Consulai e ANPROMIS (dados IFAP).

O problema central deste trabalho reside na relação entre a fisiologia da cultura e as tendências climáticas futuras. O aumento da temperatura acelera o desenvolvimento fenológico da planta, encurtando o ciclo cultural e, potencialmente, reduzindo o tempo disponível para o enchimento do grão. No entanto, o fator mais

crítico é o stress hídrico. Estudos anteriores (PAULO; PINTO, 2014) estimam que, para manter os níveis de produtividade atuais, as necessidades líquidas de rega poderão aumentar entre 16,5% e 27,5%, dependendo da severidade do cenário climático. Este aumento ocorrerá no contexto de menor disponibilidade de água nos reservatórios e aquíferos, gerando conflitos de uso da água e elevando os custos de produção (energia e taxas de recursos hídricos) que podem comprometer a rentabilidade das explorações agrícolas. Portanto, a importância deste estudo fundamenta-se no encontro entre a vulnerabilidade ambiental e a dependência económica.

O cenário projetado de redução da aptidão agrícola e de crescente pressão sobre os recursos hídricos (PAULO; PINTO, 2014) prejudicam a viabilidade da produção de milho e consequentemente podem afetar o setor pecuário aumentando a dependência da importação. Neste contexto, torna-se importante quantificar o agravamento do défice hídrico e antecipar espacialmente as zonas de maior risco de produção. Esta antecipação é fundamental para definir estratégias de adaptação e identificar os limites físicos e económicos para a viabilidade da irrigação no futuro (FRAGA et al., 2016a). Face ao exposto, a pesquisa propõe como objetivo geral a análise dos impactos das alterações climáticas na Necessidade de Rega (NR) e na Aptidão Agrícola da cultura do milho em Portugal Continental. A abordagem metodológica adotada inclui: a) Cálculo da Evapotranspiração de Referência (ET_o) pelo método de Hargreaves-Samani, b) Simulação do balanço hídrico sequencial para o período histórico (1980-2005) e cenários futuros (RCP 4.5 e RCP 8.5) e c) Interpolação espacial em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para mapear e avaliar as alterações nas classes de aptidão agrícola ao longo do século XXI (STEDUTO et al., 2009).

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar como os cenários futuros de mudanças climáticas poderão impactar as necessidades de irrigação da cultura do Milho (*Zea Mays* L.) em Portugal Continental.

1.2 Objetivos específicos

- a) Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o) para Portugal Continental através do método de Hargreaves-Samani, considerando o período histórico e as projeções climáticas futuras (cenários RCP 4.5 e RCP 8.5), face à limitação de dados para o método padrão FAO-56.
- b) Determinação da Capacidade de Água Disponível dos solos de Portugal Continental através da aplicação de funções de pedotransferência aos dados de textura do solo.
- c) Avaliação da aptidão agrícola para a cultura do milho em Portugal Continental, com base na quantificação das Necessidades de Rega (NR) e sua evolução entre o cenário histórico e os cenários de alterações climáticas (RCP 4.5 e RCP 8.5).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 A cultura do Milho e o Clima Mediterrânico

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas arvenses mais importantes no contexto agrícola mundial e português. Em Portugal, a cultura em 2024 ocupou uma área de 100 mil hectares com produtividade de 10.3 toneladas por hectare, sendo fundamental para economias regionais e nacional, tanto para produção de grãos como silagem (ANOPROMIS, 2025). Apesar de ser o cereal mais produzido no país, a produção interna cobre apenas cerca de 25% das necessidades do mercado, o que reforça a sua importância e o potencial para o aumento da produção através da expansão da irrigação (IACA, 2025), como no caso do Empreendimento de Alqueva que permitiu expandir a produção agrícola para região sul de Portugal (EDIA, 2024).

Fisiologicamente, o milho é uma planta de metabolismo C4, o que lhe confere maior eficiência fotossintética e no uso da água, produzindo mais matéria seca por unidade de água consumida em comparação com plantas C3 (TAIZ; ZEIGER, 2017). O seu desenvolvimento é influenciado pela temperatura, exigindo um mínimo de 10°C para germinação, com temperaturas ótimas de crescimento entre 24°C e 30°C (DOORENBOS; KASSAM, 1979). O ciclo da cultura divide-se em várias fases fenológicas, sendo os estádios de floração e enchimento de grãos os mais críticos para definição da produtividade final (ALLEN et al., 1998).

No entanto, a cultura enfrenta desafios específicos no clima mediterrânico, caracterizado por uma assimetria sazonal. Enquanto a precipitação concentra-se no Outono e Inverno, o ciclo de crescimento (Primavera-Verão) coincide com o período de maior evaporação e menor precipitação (IPMA, 2025). Em regiões como o Alentejo, a precipitação durante o ciclo da cultura é insuficiente para suprir as necessidades hídricas, que variam entre 500 e 600mm para o milho grãos, tornando a rega uma prática obrigatória para viabilizar a produção e atingir o potencial genético da cultura (ALLEN et al., 1998).

2.1.2 Alterações climáticas e Cenários RCP

As alterações climáticas referem-se a variações estatisticamente significativas do estado médio do clima ou da sua variabilidade, persistindo por longos períodos. Estas mudanças são impulsionadas tanto por variabilidade interna natural como por forçamentos externos, nomeadamente o aumento da concentração de

gases de efeito estufa (GEE) de origem antrópica, como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2021).

Para projetar a evolução climática futura e os seus impactos, a comunidade científica utiliza Modelos de Circulação Global (GCM) e Modelos Climáticos Regionais (RCM). Os RCM, como os desenvolvidos no âmbito do projeto CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), permitem obter projeções com maior resolução espacial (cerca de 50 km ou menos), captando melhor as especificidades orográficas regionais do que modelos globais (JACOB et al., 2014).

As projeções climáticas baseiam-se em cenários de emissões. O quinto relatório de avaliação do IPCC (AR5) adotou os Caminhos de Concentração Representativos (RCP - *Representative Concentration Pathways*), que são definidos pelo forçamento radiativo total em 2100 relativamente a 1750 (VAN VUUREN et al., 2011), sendo:

- a) RCP 4.5: Representa um cenário intermediário de estabilização, onde o forçamento radiativo estabiliza em 4.5 W/m² antes de 2100. Pressupõe a implementação de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de GEE.
- b) RCP 8.5: Corresponde a um cenário de emissões elevadas, sem políticas climáticas adicionais de mitigação, resultando em um forçamento radiativo de 8,5 W/m² em 2100. É frequentemente associado à continuidade das tendências de forte dependência de combustíveis fósseis.

Para a Península Ibérica, e Portugal em particular, os modelos projetam um aumento generalizado da temperatura média anual e uma redução da precipitação. Estima-se que o aumento da temperatura seja mais acentuado no Verão e nas regiões do interior (SANTOS; MIRANDA, 2006). Relativamente à precipitação, prevê-se uma diminuição significativa, especialmente na Primavera, o que agrava a duração e intensidade da estação seca (SOARES et al., 2017). Adicionalmente, espera-se um aumento na frequência de eventos extremos, como ondas de calor e secas severas, o que terá implicações diretas na disponibilidade de água para a agricultura irrigada (IPCC, 2021; ROLIM et al., 2017).

2.1.3 Modelação da Evapotranspiração e Necessidade de Rega

A gestão eficiente da água na agricultura fundamenta-se na quantificação precisa da evapotranspiração. A metodologia padrão (FAO 56) baseia-se na estimativa da

Evapotranspiração de Referência (ET_o), que representa a demanda evaporativa da atmosfera para uma cultura de grama 0,12 m de altura, bem irrigada e em crescimento ativo (ALLEN et al., 1998).

O método de Penman-Monteith é recomendado como padrão para o cálculo da ET_o , integrando variáveis como radiação solar, temperatura, umidade e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998). No entanto, a exigência de dados meteorológicos completos limita sua aplicação em algumas regiões. Nestes casos, a equação de Hargreaves-Samani apresenta-se como uma alternativa. Este método empírico requer apenas dados de temperatura (máxima e mínima) e radiação extraterrestre (calculada com base na latitude e dia do ano), tendo demonstrado bons resultados em climas mediterrânicos (HARGREAVES; SAMANI, 1985; SHAHIDIAN et al., 2012).

A Evapotranspiração Cultural (ET_c) é determinada multiplicando-se a ET_o pelo coeficiente de cultura (K_c), que incorpora as características biológicas da planta e o seu estágio de desenvolvimento ALLEN et. al, (1998). Para o milho, o K_c varia ao longo do ciclo, com valores baixos na fase inicial, seguido de um aumento na fase de crescimento até um máximo na fase intermediária, e decrescendo na fase final de maturação, conforme exemplificado na figura 3.

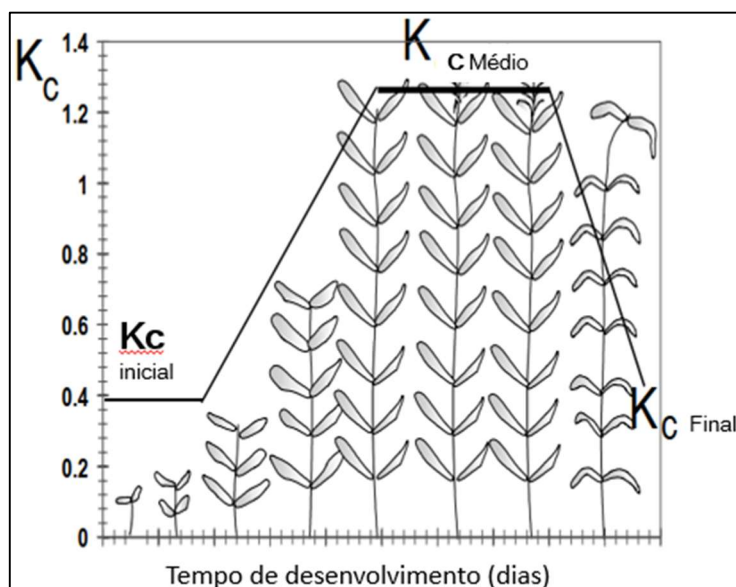


Figura 3 - Representação esquemática da variação dos coeficientes de cultura simples durante o desenvolvimento de uma planta.

As Necessidades Líquidas de Rega (NRL) correspondem à quantidade de água que deve ser fornecida artificialmente para garantir que a planta não sofra estresse hídrico, calculada pela diferença entre a ET_c e a precipitação efetiva (P_e) –

fração da chuva que é armazenada na zona radicular (ALLEN et al., 1998). Em cenários de alterações climáticas, prevê-se que o aumento da ET_o (devido à temperatura) e a redução da P_e levem a um incremento das NRL (ROLIM et al., 2017; PAULO; PINTO, 2014).

2.1.4 Capacidade de Armazenamento de Água no Solo

O solo funciona como um reservatório para água e nutrientes. A capacidade deste reservatório é definida pela Água Disponível Total (TAW), calculada pela diferença entre o teor de água à Capacidade de Campo (CC) e o Ponto de Murcha Permanente (PMP), multiplicado pela profundidade radicular (ALLEN et al., 1998). Apenas uma fração desta água, a Água Facilmente Disponível (RAW), pode ser extraída pelas plantas sem custo energético significativo que implique na quebra de produção. Quando o teor de água desce abaixo deste limite crítico (fator de depleção p), inicia-se o stress hídrico.

A determinação direta das propriedades hidráulicas do solo (curva de retenção de água, condutividade elétrica) é difícil e de alto custo. Para superar a falta de dados detalhados em estudos regionais, recorre-se a Funções de Pedotransferência (PTFs). As PTFs são modelos estatísticos, geralmente de regressão linear múltiplas, que estima propriedades hidráulicas difíceis de medir (como a CC, PWP e condutividade hidráulica saturada) a partir de características básicas do solo mais acessíveis, como a textura (percentagens de areia, limo e argila), teor de matéria orgânica e densidade aparente.

Saxton et al. (1986), desenvolveram equações e relacionam a textura do solo com os seus potenciais de retenção de água. A aplicação destas funções permite mapear a capacidade de armazenamento de água dos solos a uma escala regional, fundamental para a modelação do balanço hídrico em larga escala e para o planeamento de rega em cenários de alterações climáticas.

2.1.5 Geoprocessamento e Análise Espacial na Agricultura

Os sistemas de Informações Geográficas (SIG) desempenham um papel fundamental na agricultura moderna, facilitando o armazenamento, manipulação, análise e visualização de dados espaciais (FRAGA et al., 2016; ROLIM et al., 2017). A agricultura é, por natureza, uma atividade espacial, e o uso de SIG permite colocar

a informação de um local específico (como dados meteorológicos) numa dimensão espacial e temporal de longo prazo.

No contexto da modelação de culturas, a interface entre modelos de simulação e os SIG permite extrapolar análises pontuais para escalas regionais ou nacionais. A análise espacial requer frequentemente a conversão de dados pontuais em superfícies contínuas. Para tal, recorre-se a interpolação espacial. O método do Inverso do Quadrado da Distância (IDW – *Inverse Distance Weighting*) é uma das técnicas utilizadas para interpolar dados de grelhas de modelos climáticos regionais (RCM) e gerar mapas *rasters* de variáveis climáticas. Além do IDW, outros métodos como a krigagem (*krigins*) ou o método do vizinho mais próximo são utilizados para interpolar anomalias climáticas ou dados de precipitação e temperatura, permitindo ajustar a resolução espacial dos dados climáticos às necessidades dos modelos de culturas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo e fonte de dados climáticos

A modelagem da necessidade hídrica para a cultura do milho (*Zea mays* L.) foi realizada para Portugal Continental. A base meteorológica do estudo consistiu em dados climáticos diários provenientes de projeções de Modelos Climáticos Regionais (RCM), obtidos através do projeto CORDEX (Coordinated Regional Climate Downcaling Experiment). Optou-se por estes dados devido à resolução espacial (12 km ou 0.1°), adequada para capturar a variabilidade climática do território nacional.

A análise temporal compreendeu: a) cenário histórico no período de 1980 a 2024 que foi utilizado para caracterização das condições de referência, calibração do modelo e comparação com as projeções futuras, b) cenário RCP 4.5 (estabilização) com período de 2006 a 2100, representando um cenário de emissões intermédias, onde se assume a adoção de políticas de mitigação que conduzem à estabilização do forçamento radiativo em 4.5 W/m² antes do final do século e c) cenário RCP 8.5 (emissões elevadas) compreendendo de 2006 a 2100, representando um cenário de emissões de gases de efeito estufa, sem políticas climáticas adicionais significativas, compreendendo à trajetória de agravamento de aquecimento global.

3.2 Pré-processamento e tratamento dos dados

Uma vez que os dados climáticos originais obtidos do CORDEX são disponibilizados em formato multidimensional NetCDF (Network Common Data Form) e em sistemas de coordenadas geográficas globais, foi necessário realizar uma etapa preliminar de normalização espacial utilizando o software de Sistema de Informação Geográfica QGIS versão 3.40.7. O fluxo de trabalho geoespacial foi estruturado nas seguintes operações: Extração e Conversão, onde as variáveis meteorológicas diárias foram extraídas dos arquivos NetCDF e convertidas para o formato matricial GeoTIFF (Tagged Image File Format), o que garantiu a preservação dos metadados e dos valores físicos. Em seguida, na fase de Reprojeção e Reamostragem, as camadas foram reprojatadas para o sistema de referência oficial de Portugal (ETRS89 / PT-TM06) ou WGS84, assegurando a consistência geométrica. Por fim, o Recorte e Alinhamento (Clipping & Alignment) foi realizado utilizando a Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) e os limites das NUTS II para recortar (crop) a grelha europeia, restringindo a área de estudo a Portugal Continental. Adicionalmente, procedeu-se ao alinhamento dos pixels (snap raster) de todas as variáveis (como temperatura, radiação, e vento) para garantir que cada célula da grelha tivesse correspondência espacial exata nas operações de álgebra de mapas subsequentes.

3.2.1 Variáveis meteorológicas e pré-processamento

Após a harmonização espacial no QGIS, procedeu-se ao processamento numérico em ambiente R, utilizando o pacote terra (HIJMANS, 2024). Abaixo descreve-se a natureza física de cada variável e o seu papel na modelação.

3.2.1 Temperatura do ar

A temperatura do ar representa a natureza física da energia térmica medida a 2 metros de altura. O processamento dos dados exigiu a uniformização das unidades de medidas. Os valores originais, fornecidos na escala Kelvin (K), foram convertidos para a escala de graus Celcius ($^{\circ}C$). Posteriormente, para obter a temperatura média diária (T_{med}) foi determinada através do cálculo da média aritmética entre os valores de temperatura máxima e mínima registrada no dia.

A temperatura constitui um parâmetro meteorológico importante para modelagem biofísica, visto que atua como principal regulador da pressão de saturação de vapor (e_s). Esta relação estabelece a capacidade máxima de retenção de vapor de água pela atmosfera. Um aumento na temperatura eleva intrinsecamente a capacidade

higroscópica do ar, influenciando a taxa de absorção de umidade da cultura. Adicionalmente, a temperatura é um fator determinando que influencia o cálculo de fluxo de calor latente de vaporização, que é um componente do balanço energético de superfície.

3.2.2 Radiação solar e onda curta (Rs)

A variável Rs corresponde ao fluxo de radiação solar descendente (*Surface Downwelling Shortwave Radiation*) que incide sobre a superfície terrestre. Seu processamento envolveu a conversão dos dados originais, expressos em fluxo de potência instantânea em $W.m^{-2}$, para a densidade de energia diária acumulada, cuja unidade é $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$, por meio do fator 0,0864. A radiação solar de onda curta é a principal fonte de energia que impulsiona o processo de evapotranspiração, sendo fundamental para a derivação da Radiação Líquida (Rn). Esta última representa o saldo de energia efetivamente disponível para o sistema cultura-solo, após serem descontadas as perdas por reflexão (albedo da cultura) e a emissão de radiação de onda longa para a atmosfera.

3.2.3 Umidade atmosférica e déficit de pressão de vapor

A umidade atmosférica refere-se à concentração de vapor de água presente na massa de ar. No processamento, os dados de umidade relativa (RH, em %) ou umidade específica (q, em $kg.kg^{-1}$) foram utilizados como inputs para o cálculo da Pressão Atual de Vapor (e_a). O déficit de pressão de vapor (DPV) é calculado pela diferença entre pressão de saturação (e_s , determinada pela temperatura do ar) e a pressão atual de vapor (e_a), sendo calculada pela equação (1):

$$DPV = e_s - e_a \quad (1)$$

A pressão de saturação (e_s) e a pressão atual de vapor (e_a) são determinadas pelas equações (2) e (3), respectivamente:

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times T}{T + 237,3}\right) \quad (2)$$

$$e_a = \frac{RH}{100} \cdot e_s \quad (3)$$

Onde e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa), T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), e_a é a pressão atual de vapor (kPa), RH é a umidade relativa média diária (%).

O DPV é um indicador da necessidade hídrica da atmosfera, sendo que um déficit elevado (associado a ar quente e seco) indica um gradiente acentuado, resultando em uma maior taxa transpiratória da planta.

3.2.4 Velocidade do vento

A velocidade do vento corresponde ao movimento horizontal da massa de ar na atmosfera. O processamento exigiu o ajuste dos dados originais (modelados para 10 metros) para altura padrão de 2 metros (u_2), realizado por meios da aplicação do perfil logarítmico de velocidade do vento, dado pela equação (4):

$$u_2 = u_z \left[\frac{\ln \frac{2}{z_0}}{\ln \frac{z}{z_0}} \right] \quad (4)$$

Onde u_2 é a velocidade do vento ajustada para altura de 2 metros (m.s^{-1}). u_z é a velocidade do vento original na altura de medição z (m.s^{-1}). z refere-se a altura de medição a 10 metros (m) e z_0 é o parâmetro de rugosidade da superfície de referência (vegetação curta) de aproximadamente 0,0002 metros (m).

Uma inconsistência encontrada foi a ausência de dados em pixels costeiros devido à máscara terra/mar do modelo climático (Figura 4). Para corrigir esse efeito de borda, foi implementado um algoritmo de preenchimento espacial por vizinhança (*focal mena imputation*), assegurando a continuidade dos dados eólicos em toda a faixa litorânea.

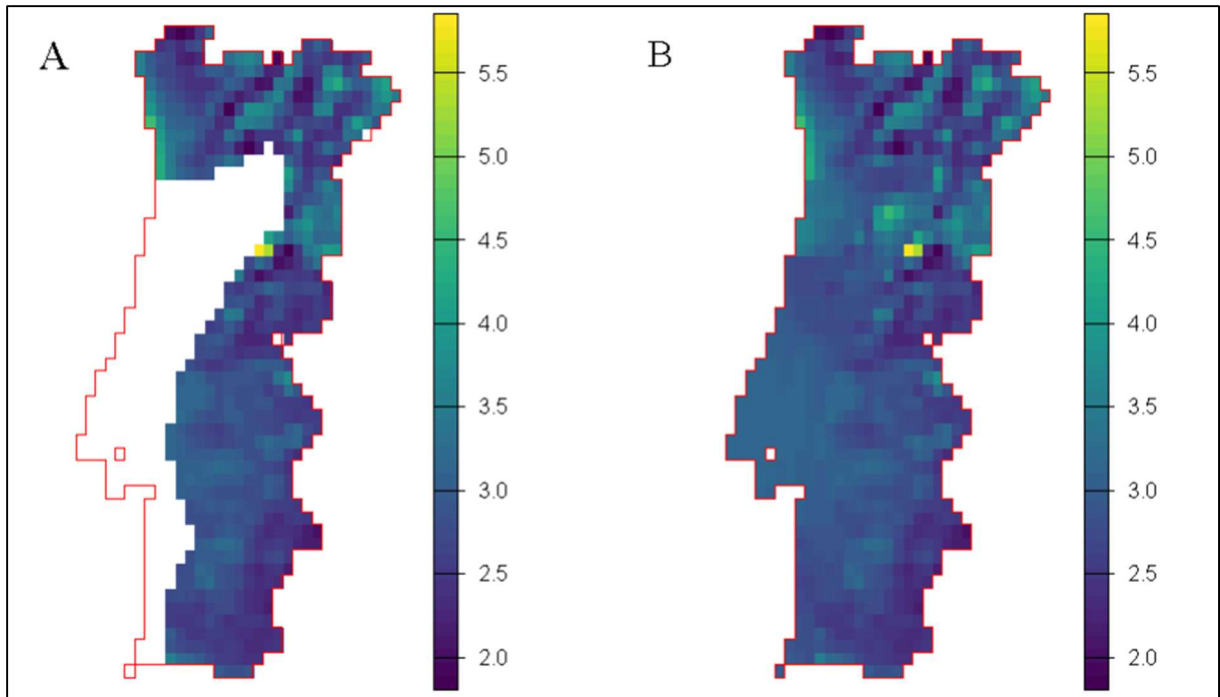


Figura 4 - Efeito de borda. A) Região branca destacando a falha de preenchimento de pixels. B) mapa após o preenchimento espacial por vizinhança.

Fonte: do autor (2025).

O vento desempenha um papel importante no modelo ao incluir o fenômeno de transporte turbulento, facilitando a remoção da camada limite de ar saturado que se estabelece sobre as superfícies foliares. Na ausência de movimento do ar, o ar adjacente à folha saturaria rapidamente, levando ao interrompimento do processo de evapotranspiração.

3.2.4 Precipitação

A precipitação é definida como a água que atinge a superfície do solo. No processamento, os dados fornecidos como fluxo de massa ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) foram integrados temporalmente para obter o volume diário, expresso em milímetros (mm.dia^{-1}). No contexto do modelo, a precipitação representa a oferta hídrica natural. Foi convertida em Precipitação Efetiva (Pe) sob a premissa de um coeficiente de aproveitamento de 80% ($Pe = 0,8 \times P$), visando descontar as perdas estimadas por escoamento superficial e percolação profunda.

3.3 Cálculo da Evapotranspiração de Referência

Embora o método de Penman-Monteith FAO-56 seja considerado o padrão internacional para a estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_0), a

sua aplicação em estudos de cenários climáticos futuros é frequentemente limitada pela ausência ou baixa fiabilidade das projeções de radiação solar, humidade relativa e velocidade do vento nos modelos regionais.

Face a estas limitações nos dados do projeto CORDEX, optou-se pela utilização do método de Hargreaves-Samani (1985) para o cálculo da ET_0 em toda a série temporal (histórico e cenários futuros). Este método requer apenas dados de temperatura do ar (máxima e mínima) e radiação extraterrestre, sendo robusto para capturar as tendências de aquecimento global. A ET_0 foi calculada através da equação (4):

$$ET_0 = 0,0023 \times Ra \times (T_{med} + 17,8) \times \sqrt{(T_{max} - T_{min})}$$

Onde ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm.dia^{-1}), Ra é a radiação extraterrestre (mm.dia^{-1}) calculada em função da latitude e do dia do ano, T_{med} , $T_{máx}$ e $T_{mín}$ são, respectivamente, a temperatura média, máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Para garantir a robustez das projeções, procedeu-se a uma validação cruzada no período histórico (1980-2005). Comparou-se a ET_0 calculada pelo método simplificado (Hargreaves-Samani) com o método padrão (FAO-56 Penman-Monteith) pixel a pixel. A performance foi avaliada através do coeficiente de determinação (R^2) e do erro quadrático médio (RMSE), permitindo identificar possíveis vieses do modelo simplificado (os resultados desta validação encontram-se descritos na sessão de Resultados).

3.4 Caracterização da cultura e capacidade de armazenamento de água do solo

Os cálculos de necessidade de rega e aptidão foram avaliados especificamente para a cultura do milho irrigado no ciclo primavera-verão. A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi obtida multiplicando a ET_0 pelos valores de coeficiente de cultura (K_c) ajustados para os meses de rega (maio a setembro), conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficiente cultural para cultura do Milho

Fase inicial	Crescimento lento	Crescimento acelerado	Máximo desenvolvimento	Fase final
0,30	0,7	1,05	1,2	0,8

Fonte: Doorenbos e Kassan (1979).

A Capacidade de Água Disponível (TAW) foi espacializada aplicando funções de pedotransferência (PTFs) aos dados de textura e carbono orgânico provenientes do SoilGrids. Utilizaram-se as equações de regressão múltipla propostas por Saxton e Rawls (2006), que estimam o conteúdo de água à Capacidade de Campo (θ_{33kPa}) e ao Ponto de Murcha Permanente ($\theta_{1500kPa}$) com base nas frações de areia, argila e matéria orgânica.

A matéria orgânica foi derivada do teor de carbono orgânico do solo (SOC) aplicando o fator de conversão de 1,724. Posteriormente, a TAW (mm) foi calculada pela diferença entre o teor de água na Capacidade de Campo e no Ponto de Murcha Permanente, multiplicada pela profundidade efetiva do sistema radicular (Zr), fixada em 1,0 m (1000 mm) para a cultura do milho, conforme a Equação 5:

$$TAW = 1000 \cdot (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (6)$$

3.5 Cálculo da necessidade de rega

A determinação da Necessidade Líquida de Rega (NR) baseou-se na simulação de um balanço hídrico sequencial diário, quantificando o déficit entre a procura atmosférica da cultura e a oferta natural de água. O modelo computacional integrou os dados meteorológicos diários (ET_c e Precipitação) ao longo da série temporal, permitindo capturar a variabilidade intra-sazonal do clima. Para a inicialização do modelo no início do ciclo cultural (1 de maio), assumiu-se que o perfil do solo apresenta uma reserva hídrica correspondente a 50% da Capacidade de Água Disponível (TAW). Esta premissa fundamenta-se na ocorrência típica de precipitação acumulada durante o outono e inverno em clima mediterrânico, que promove a recarga parcial ou total do perfil do solo antes da semeadura. Dessa forma, a Necessidade de Rega anual foi calculada como o somatório do déficit hídrico climático ($ET_c - P_e$) acumulado durante o período de rega (maio a setembro), descontando-se a contribuição da água armazenada no solo no início do ciclo, conforme expresso na Equação (6):

$$NR_{anual} = \max \left(0; \sum_{Maio}^{Set} (ET_c - P_e) - (0,5 \times TAW) \right)$$

Onde:

- NR: Necessidade Líquida de Rega acumulada no ano (mm);
- ET_c : Evapotranspiração da cultura diária (mm);
- P_e : Precipitação efetiva diária (mm);
- TAW: Capacidade de Água Disponível Total no solo (mm);
- 0.5: Fator de depleção inicial (50% da reserva disponível).

A aplicação da função $\max(0, \dots)$ assegura que, em anos húmidos onde a precipitação e a reserva do solo superam a procura evapotranspirativa, a necessidade de rega é nula, evitando valores negativos fisicamente impossíveis.

3.6 Definição das classes de aptidão agrícola

A avaliação da aptidão agrícola para a cultura do milho foi realizada através da reclassificação dos mapas de Necessidade Líquida de Rega (NRL), considerando a disponibilidade de água como o fator crítico limitante para a viabilidade da cultura em clima mediterrânico. As classes de aptidão foram definidas tendo por referência as dotações de rega praticadas nos principais Aproveitamentos Hidroagrícolas nacionais (EFMA - Alqueva). Assumindo uma eficiência global de rega média de 75-80%, estabeleceram-se quatro classes de aptidão (Tabela 2):

- Aptidão Elevada ($NRL < 300$ mm): Corresponde a zonas onde a precipitação natural satisfaz grande parte das necessidades da cultura. A rega atua apenas como complemento, apresentando custos energéticos reduzidos e maior viabilidade a longo prazo.
- Aptidão Moderada (> 300 $NRL < 450$ mm): Representa o cenário típico da agricultura irrigada em Portugal. As necessidades hídricas situam-se dentro dos intervalos médios históricos.
- Aptidão Marginal ($450 > NRL < 550$ mm): Zonas de elevado risco, onde a procura atmosférica impõe volumes de rega elevados. Nestas condições, a rentabilidade da cultura torna-se muito sensível ao preço da água e da energia, estando a viabilidade dependente de anos hidrológicos favoráveis.
- Inapta ($NRL > 550$ mm): Considerou-se o limite de 550 mm de necessidade líquida como limite da viabilidade. Uma necessidade líquida superior a este valor implica uma rega bruta superior a $7.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Este volume excessivo

eleva os custos de produção e coloca um uso insustentável sobre os recursos hídricos, justificando a classificação da área como inapta para a cultura intensiva do milho em cenários de escassez.

Tabela 2 - Critérios de classificação da aptidão agrícola com base na Necessidade Líquida de Rega (NRL).

Classe de Aptidão	Cor no Mapa	Intervalo de NRL (mm/ciclo)	Justificativa Técnica
Elevada	Verde	< 300	Irrigação de complemento; Baixo custo.
Moderada	Amarelo	300 - 450	Média nacional; Viável.
Marginal	Laranja	450 - 550	Limite da eficiência econômica.
Inapta	Vermelho	> 550	Insustentável (Rega bruta estimada > 7.000 m ³ ha ⁻¹).

Fonte: Elaboração própria baseada nos limites técnicos de dotação de rega (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das condicionantes edafoclimáticas

4.1.1 Capacidade de armazenamento de água no solo (TAW)

A capacidade do solo em armazenar água e disponibilizá-la às plantas constitui um fato determinante no balanço hídrico das culturas agrícolas, influenciando diretamente a quantidade e o momento das necessidades de rega. A capacidade de água disponível total (Total Available Water – TAW) atua como um regulador do sistema solo-planta-atmosfera, funcionando como um reservatório temporário que atenua os efeitos de irregularidade temporal das precipitações, típica do clima mediterrânico.

A Figura 5, ilustra a distribuição espacial da TAW estimada para Portugal Continental, expressa em milímetros (mm), considerando uma profundidade radicular efetiva (Zr) de 1.0 m, valor compatível com o desenvolvimento radicular da cultura do milho em condições agronômicas adequadas.

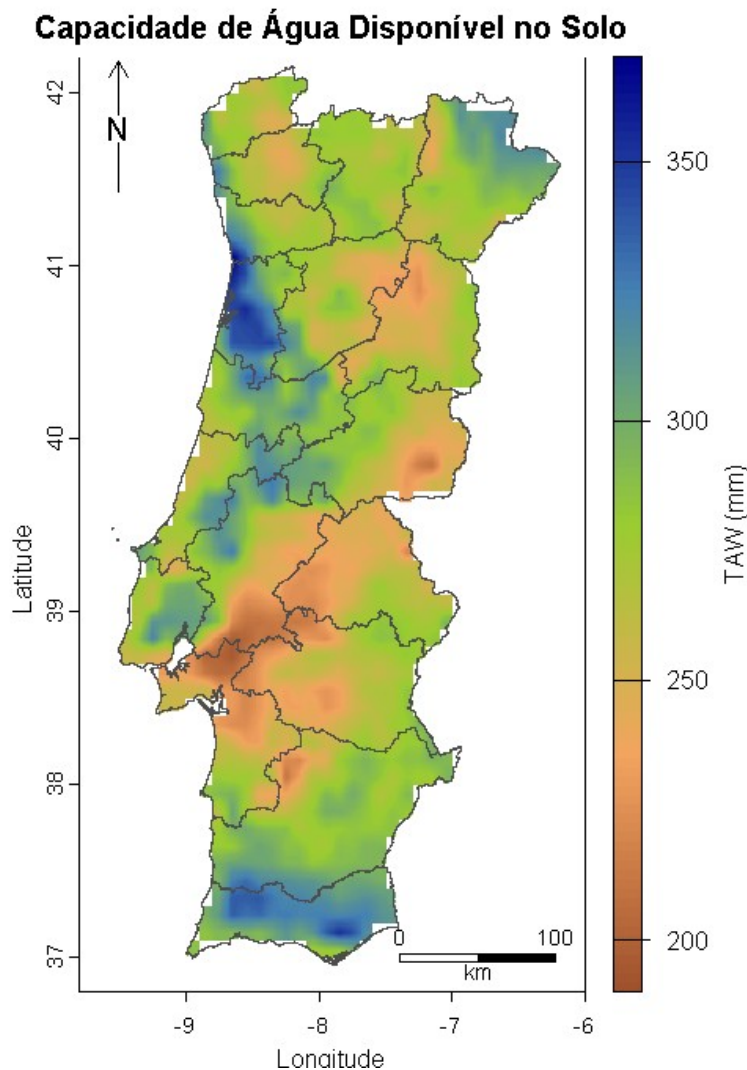


Figura 5 - Distribuição espacial da Capacidade de Água Disponível (TAW) em Portugal Continental. Nota: Valores estimados em milímetros (mm) para uma profundidade de solo de 1,0 m, com base na textura e teor de carbono orgânico.

Fonte: do autor (2025)

Os valores apresentados correspondem à quantidade total de água potencialmente disponível às plantas no perfil explorado pelas raízes, calculada a partir da diferença entre o teor de água à capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

A análise do mapa releva uma variabilidade espacial da TAW à escala nacional, com valores variando entre 190 mm e valores superiores a 360 mm. Esta heterogeneidade reflete a diferença significativa nas propriedades físicas e hidráulicas do solo, nomeadamente textura, teor de matéria orgânica e profundidade efetiva.

Observam-se valores elevados de TAW (> 300 mm), em particular, nas áreas do Litoral Norte e Centro, incluindo a região do Baixo Vouga, bem como o valor inferior

do rio Tejo, correspondente às Lezírias do Ribatejo. Estas regiões caracterizam-se, em geral, pela presença de solos aluviais profundos, com texturas médias a finas (francas a franco-argilosas) e maior capacidade de retenção de água, conferindo-lhes uma elevada reserva hídrica no perfil do solo.

Em contraste, valores reduzidos de TAW (<230-250mm) concentram-se sobretudo no Interior Sul do país, nomeadamente em extensas áreas do Alentejo, bem como em setores da Beira Interior. Estas zonas estão frequentemente associadas a solos de textura mais arenosas, solos rasos e com menor teor de matéria orgânica, condições que limitam a capacidade de retenção de água e resultam em uma menor disponibilidade hídrica para as culturas.

Esta variabilidade espacial da TAW tem implicações diretas na gestão da rega da cultura do milho. Nas regiões com elevada capacidade de armazenamento de água no solo, a precipitação acumulada durante o período úmido de (inverno e início de primavera) pode ser parcialmente armazenada no perfil do solo, permitindo que a cultura utilize esta água armazenada durante as fases iniciais do ciclo de desenvolvimento, compreendendo desde a emergência e o desenvolvimento vegetativo inicial. Nestas condições, o início da rega pode ser iniciado em um estágio mais avançado da cultura.

Por outro lado, nas regiões com baixos valores de TAW, o esgotamento da reserva de água no solo ocorre de forma mais precoce, sobretudo em contexto de elevada evapotranspiração atmosférica. Consequentemente, torna-se necessário o fornecimento de água por rega logo nas primeiras fases do ciclo da cultura, de modo a evitar a ocorrência de stress hídrico e o rendimento final da cultura.

4.1.2 Tendências evolutivas da temperatura e precipitação

A Figura 6, apresenta a distribuição espacial da temperatura média do ar (°C) em Portugal Continental para o período histórico de referência (1971-2000) e para três janelas temporais futuras (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100), considerando os cenários de emissão RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados evidenciam alterações consistentes tanto na magnitude quanto no padrão espacial da temperatura ao longo do século XXI, com diferenças mascaradas entre os dois cenários de concentração radiativa.

No período histórico (1971-2000), observa-se um gradiente térmico bem definido com temperaturas médias mais elevadas no Sul do país, particularmente no

Alentejo, e valores mais reduzidos no Norte e nas regiões de maior altitude, refletindo a influência combinada da latitude, proximidade ao oceano atlântico e topografia.

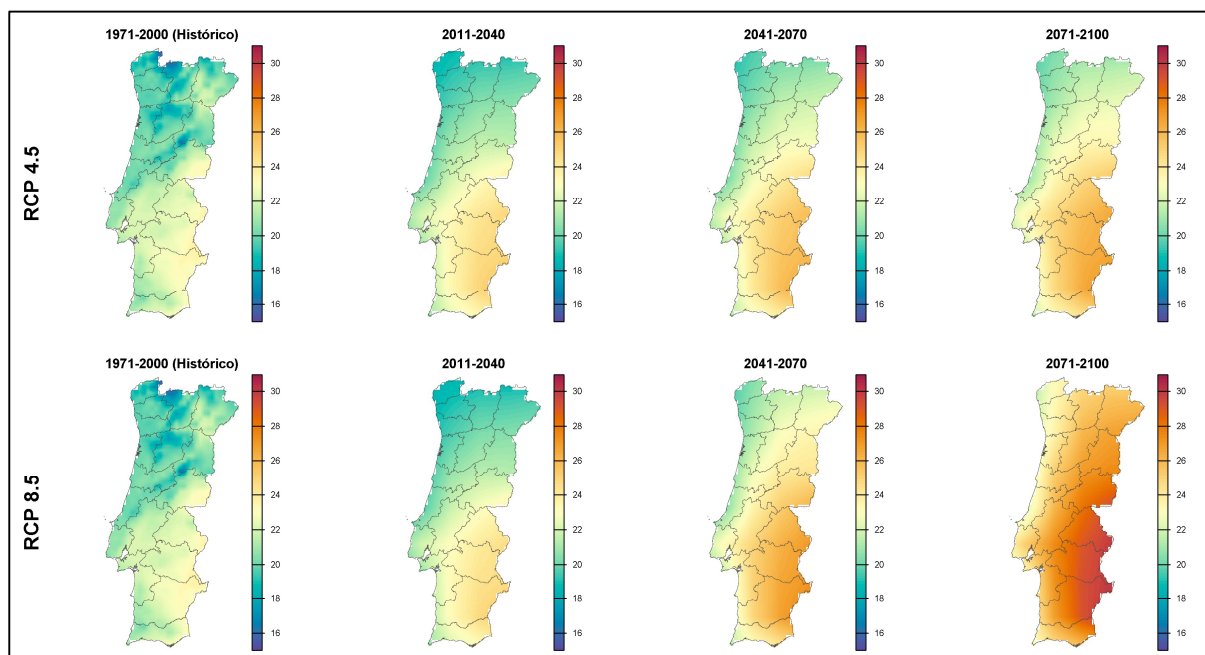


Figura 6 - Evolução espacial da temperatura média do ar (AT, °C) durante o período de crescimento do milho (abril–outubro) em Portugal Continental, para o período histórico (1971–2000) e cenários futuros (2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100), considerando os cenários climáticos RCP 4.5 (emissões intermédias) e RCP 8.5 (emissões elevadas).

Fonte: do próprio autor (2025).

Sob o cenário RCP 4.5, verifica-se um aumento progressivo da temperatura média do ar ao longo do século, embora de forma moderada quando comparado ao cenário mais pessimista. No horizonte 2011-2040, o aumento térmico é relativamente homogêneo, com acréscimos da ordem de 1 a 1.5 °C em relação ao período histórico, mantendo-se o padrão espacial observado no clima de referência.

No período intermédio (2041-2070), o aquecimento torna-se mais evidente, especialmente nas regiões do Interior Centro e Sul, onde as temperaturas médias passam a situar predominantemente entre 24 e 26 °C. Já no final do século (2071-2100), o cenário RCP 4.5 projeta um aquecimento adicional, com ampliação nas áreas sujeitas a temperaturas médias superiores a 26 °C, sobretudo no Alentejo e no Interior do Algarve. Apesar deste aumento, o gradiente Norte-Sul permanece claramente definido, indicando que, mesmo com mitigação parcial das emissões, ocorrerá o aquecimento regional.

No cenário RCP 8.5, as alterações térmicas projetadas são mais intensas e espacialmente acentuadas. No período 2011-2040, já observa um aumento

térmico comparável ou superior ao projetado para períodos mais tardios do RCP 4.5, com grande parte do território apresentando temperaturas médias acima de 22-24 °C. Entre 2041-2070, o aquecimento intensifica-se no interior Sul, onde as temperaturas médias superam com frequência os 26 °C. Este padrão reflete uma amplificação do efeito continental e uma mudança do efeito moderador do Atlântico nas regiões interiores.

No horizonte final de século (2071-2100), o cenário RCP 8.5 projeta um aumento térmico significativo, com extensas áreas do Alentejo e do Vale do Guadiana apresentando temperaturas médias superiores a 29-20 °C. Este aumento generalizado resulta numa homogeneização térmica relativa do território, com menor contraste entre regiões litorais e interiores, principalmente no Sul do país. Do ponto de vista agroclimático, o aumento da temperatura média do ar poderá conduzir a um encurtamento do ciclo das culturas, em resultado da aceleração dos processos metabólicos e fenológicos, potencialmente afetando a produtividade, sobretudo em regiões mais vulneráveis com o Centro do país. Contudo, o prolongamento da estação de crescimento e a ocorrência e temperaturas mais favoráveis durante períodos tradicionalmente limitantes podem também criar oportunidades para a intensificação dos sistemas de produção.

A Figura 7, apresenta a evolução espacial da precipitação acumulada durante o ciclo estendido da cultura do milho (abril a outubro) em Portugal Continental, comparando o período histórico de referência (1971-2000) com três horizontes futuros (2011-2040, 2040-2070 e 2071-2100), sob os cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5.

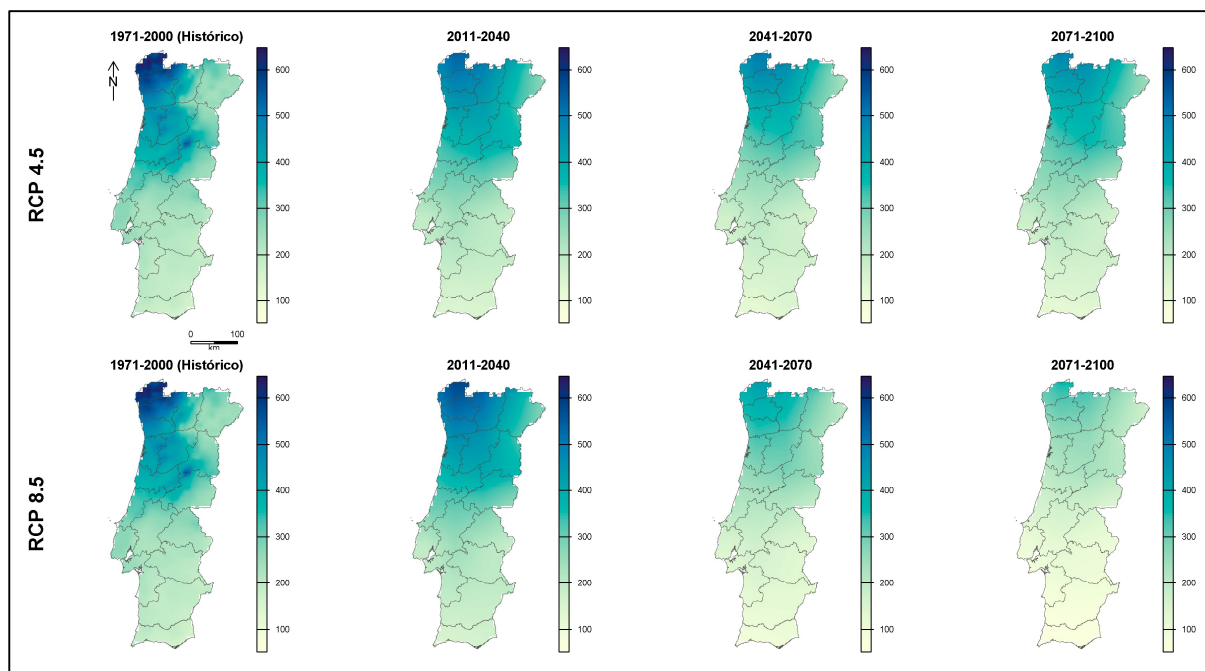


Figura 7 - Distribuição espaciotemporal da precipitação acumulada durante a estação de crescimento do milho (Abril a Outubro) em Portugal Continental: comparação entre a climatologia histórica (1971–2000) e projeções futuras (2011–2100) sob cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Fonte: do próprio autor (2025).

No período histórico (1971-2000), observa-se uma variação da precipitação em função da latitude, típico do clima mediterrânico, com maiores acumulados no Norte de Portugal (Minho e Douro Litoral), onde os valores durante o ciclo do milho variam entre 400-600mm. Em comparação, as regiões do Centro Interior, Alentejo e Algarve apresentam acumulados inferiores, abaixo de 200 mm, indicando um défice hídrico durante a estação de crescimento da cultura. Este padrão demonstra a limitada aptidão do milho em regime de sequeiro na maior parte do território nacional, sobretudo no Sul, onde a precipitação natural cobre apenas uma fração das necessidades hídricas da cultura.

As projeções climáticas indicam uma tendência de redução da precipitação acumulada ao longo do século XXI, em concordância com a literatura baseada em modelos climáticos regionais para Península Ibérica. Sob o cenário RCP 4.5, observa-se uma diminuição moderada da precipitação durante o ciclo do milho. Embora o Norte do país mantenha, nos períodos iniciais, os maiores acumulados pluviométricos, ocorre uma diminuição das áreas mais húmidas. No entanto, os mapas espaciais e o gráfico estatístico revelam que, no final do século, alguns distritos do Norte Interior, como Bragança e Vila Real, apresentam uma variação positiva ou próximo a estabilidade, o que sugere uma menor elevação de temperatura sob um

cenário de emissões intermediárias. Este resultado contrasta parcialmente com estudos baseados em CMIP5, que indicam reduções homogêneas em todas as regiões, e sugere que os modelos CMIP6 podem estar captando melhor os efeitos regionais de precipitação.

Em contraste, o cenário RCP 8.5 projeta uma redução alta e progressiva em todo o território nacional. No período de médio prazo (2041-2070), a diminuição torna-se expressiva nas regiões Cento e Sul. No final do século (2071-2100), os mapas espaciais evidenciam o crescimento de áreas com precipitação acumulada inferior a 100 mm, especialmente no Alentejo e Algarve para o período de cultivo, enquanto regiões historicamente úmidas também apresentam redução na precipitação.

A Figura 8, mostra os padrões observados na análise espacial. Verifica-se que as maiores reduções percentuais ocorrem nos distritos do Sul, com destaque para Faro, que apresenta a redução mais acentuada no cenário RCP 8.5 de aproximadamente 50% em relação ao período histórico.

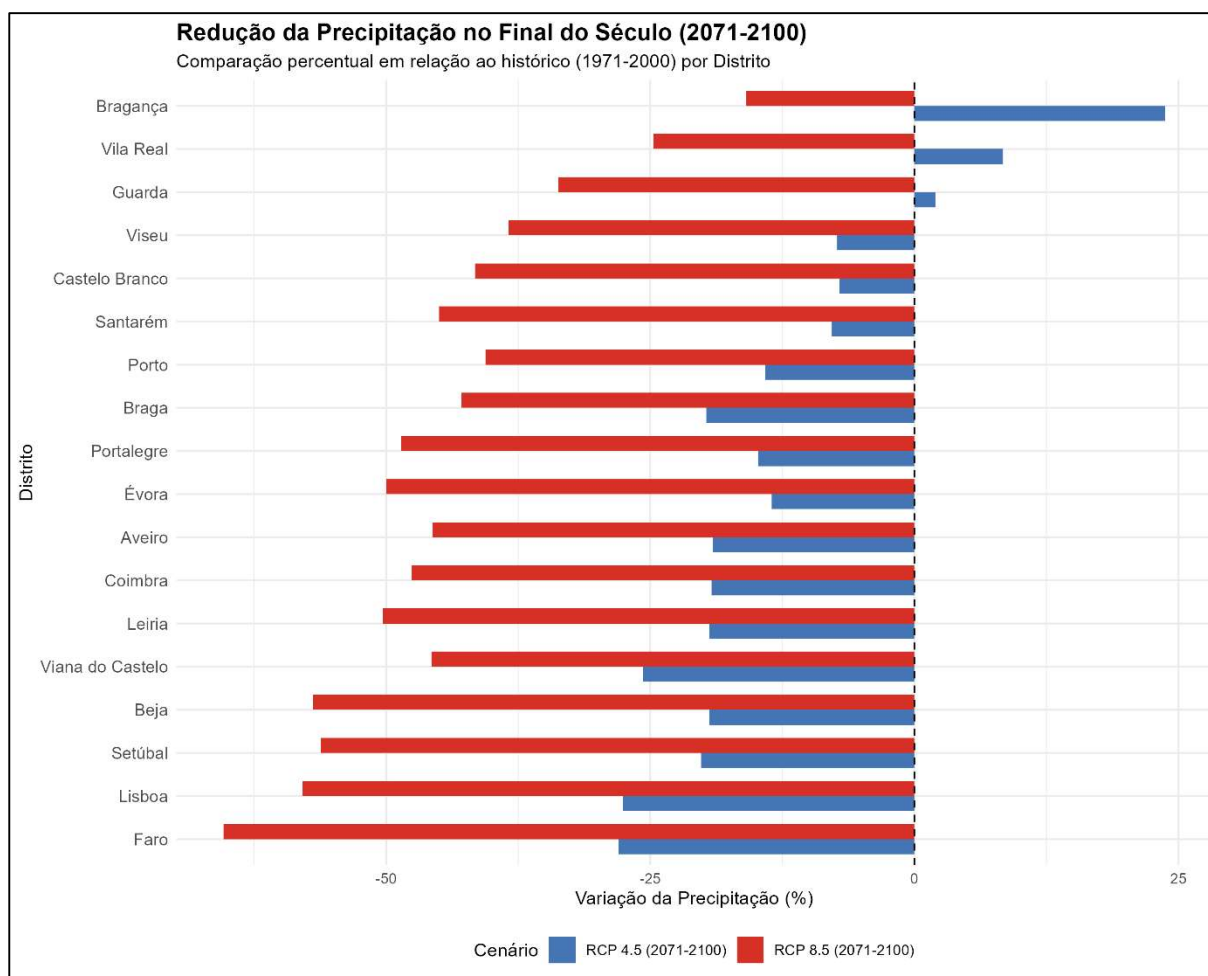


Figura 8 - Redução percentual da precipitação acumulada no período de crescimento do milho (abril-outubro) no final do século (2071–2100), comparativamente ao período histórico (1971–2000), separada por distrito em Portugal Continental, considerando os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5.

Fonte: do próprio autor (2025).

Este valor é superior à redução de 44 % reportada em estudos baseados em CMIP5, sugerindo que os modelos CMIP6 utilizados neste trabalho projeta um cenário mais pessimista para o Sul de Portugal.

Os distritos do Alentejo (Beja, Évora e Portalegre) e da Área Metropolitana de Lisboa (Setúbal e Lisboa) também exibem reduções superiores a -40% no RCP 8.5, confirmando a existência de um hotspot de aridificação no Sul e Centro-Sul do país. Por outro lado, no cenário RCP 4.5, a redução percentual da precipitação é menos severa e especialmente mais heterogénea. Enquanto a maioria dos distritos apresenta decréscimos entre -10% e -30%, alguns distritos do Norte Interior mostram valores próximos de zero ou ligeiramente positivos, contrariando a generalização de uma redução uniforme em todas as regiões.

A análise integrada dos mapas espaciais e da estatística dos distritos demonstra que a precipitação natural durante o período abril-outubro é, já no clima atual, insuficiente para suprir a demanda hídrica do milho, que varia entre 500 – 800mm por ciclo. As projeções futuras indicam um agravamento significativo deste déficit, principalmente sobre o cenário RCP 8.5, onde a redução da precipitação e aumento da evapotranspiração potencial intensifica o risco de estresse hídrico.

4.1.3 Tendências evolutivas da evapotranspiração de referência

Para validar a aplicabilidade do método de Hargreaves-Samani (HS) no contexto climático português, procedeu-se a uma comparação espacial pixel a pixel com o método padrão FAO-56 Penman-Monteith (PM), utilizando a série histórica de 1980 a 2005. A análise de regressão linear, apresentada na Figura 9, revelou um coeficiente de correlação (R^2) de 0,71, indicando que o método simplificado é capaz de explicar a variabilidade espacial da evapotranspiração no território.

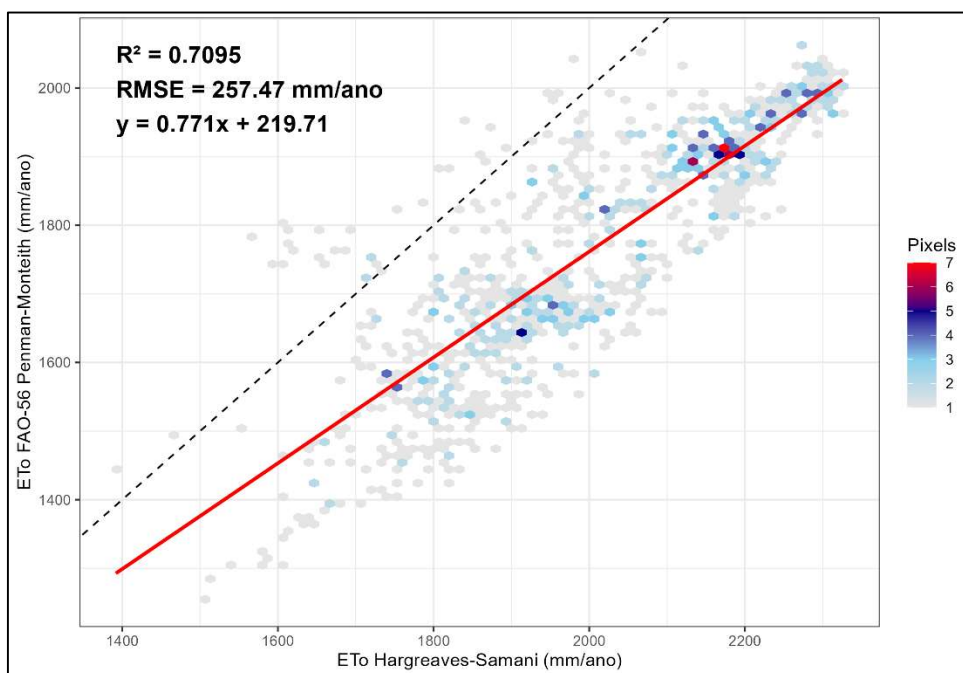


Figura 9 – Análise de correlação entre a ET_0 média anual estimada pelo método Hargreaves-Samani e o método padrão FAO-56 Penman-Monteith para Portugal Continental (média do período 1980-2005).
Fonte: do autor (2025).

Observa-se que a linha de tendência (vermelha) se situa abaixo da linha de identidade 1:1 (tracejada). Isto indica que o método HS tende a superestimar os valores de ET_0 anual em comparação com o método padrão. Este comportamento corrobora os resultados obtidos por Trajkovic (2007), que também identificou uma

tendência de superestimativa do método de Hargreaves em condições húmidas ao compará-lo com o método de Penman-Monteith. Enquanto o método PM incorpora variáveis como a velocidade do vento e a humidade relativa — que tendem a moderar a evapotranspiração em certas regiões litorais — o método HS, baseado apenas na amplitude térmica, projeta uma procura atmosférica superior.

O erro quadrático médio (RMSE) obtido foi de 257,47 mm/ano, o que representa um desvio aceitável dada a escala nacional do estudo. Do ponto de vista do planeamento da irrigação e adaptação às alterações climáticas, esta tendência de superestimativa do método HS confere uma margem de segurança aos resultados.

A Figura 10, apresenta a distribuição espacial e a evolução temporal da Evapotranspiração de Referência (ET_o) acumulada ao longo do ciclo fenológico do milho, compreendido entre abril e outubro, para o período de referência climatológica (1980–2005) e para as projeções futuras (2011–2100), considerando os cenários de concentração representativa RCP 4.5 e RCP 8.5.

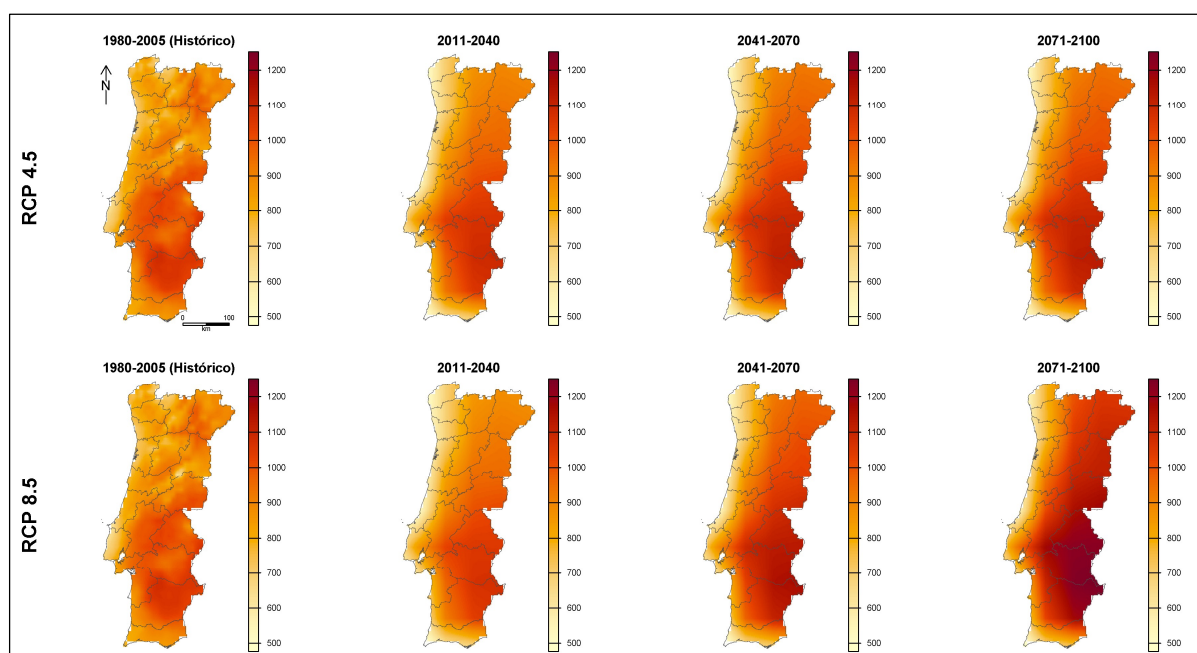


Figura 10 - Distribuição espaciotemporal da Evapotranspiração de Referência (ET_o) acumulada durante a estação de crescimento (abril a outubro) em Portugal Continental. Comparação entre o período histórico (1980–2005) e as projeções futuras (2011–2100) sob os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Independentemente do período analisado, observa-se um gradiente latitudinal bem definido da ET_o em Portugal Continental. As menores taxas acumuladas concentram-se no Norte e no litoral Noroeste, regiões sob maior influência oceânica, caracterizadas por menores amplitudes térmicas e maior umidade

relativa do ar. Em contraste, os valores mais elevados de ET_o ocorrem sistematicamente no Sul do país, particularmente nas regiões do Alentejo, Algarve e no interior do Vale do Tejo, onde predominam condições de maior continentalidade climática, temperaturas elevadas e menor disponibilidade hídrica atmosférica.

No período histórico (1980–2005), a ET_o acumulada ao longo do ciclo do milho apresenta valores predominantemente entre 700 e 900 mm na metade sul do território, correspondendo a taxas médias diárias da ordem de 3,5 a 4,2 mm dia⁻¹. Esses valores são compatíveis com o regime climático mediterrânico, caracterizado por verões quentes, secos e com elevada demanda evaporativa da atmosfera.

As projeções climáticas indicam um aumento progressivo e espacialmente generalizado da ET_o ao longo do século XXI. No cenário RCP 4.5, observa-se uma intensificação gradual da demanda atmosférica por vapor d'água, com expansão das áreas que apresentam ET_o acumulada superior a 1.000 mm no período final do século, sobretudo no interior do território continental. Embora expressivo, esse incremento ocorre de forma menos acentuada quando comparado ao cenário de maiores emissões.

O cenário RCP 8.5 evidencia alterações substancialmente mais intensas na capacidade evaporativa da atmosfera. A partir do período de 2041–2070, áreas com elevada ET_o passam a abranger praticamente toda a região ao sul do rio Tejo. No período de 2071–2100, os valores acumulados de ET_o atingem e, localmente, ultrapassam 1.200 mm ao longo do ciclo analisado, representando um incremento absoluto da ordem de 350 a 400 mm em relação ao período histórico nas regiões meridionais do país.

É importante destacar que a ET_o representa a demanda evaporativa potencial da atmosfera, definida como a evapotranspiração de uma superfície de referência composta por gramínea bem irrigada, em crescimento ativo e sem restrições hídricas. Assim, valores acumulados próximos de 1.200 mm não correspondem diretamente à lâmina de água efetivamente consumida pela cultura do milho, mas sim à capacidade máxima da atmosfera em remover água do sistema solo–planta–atmosfera durante o período considerado.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) resulta da modulação dessa demanda atmosférica pela resposta fisiológica e morfológica da cultura, expressa pelo coeficiente cultural (K_c). Ao longo do ciclo do milho, o K_c varia significativamente entre os estádios fenológicos, assumindo valores inferiores a 1,0 nas fases iniciais e finais

e próximos ou ligeiramente superiores à unidade apenas durante o período de máximo desenvolvimento vegetativo. Portanto, mesmo sob condições de ET_0 acumulada elevada, a ET_c será sempre inferior à ET_0 integrada, refletindo a dinâmica do dossel, a área foliar ativa e os mecanismos de controle estomático.

Do ponto de vista físico, o aumento expressivo da ET_0 projetada sob o cenário RCP 8.5 está associado à intensificação do déficit de pressão de vapor do ar, impulsionado principalmente pela elevação das temperaturas máximas e pelo aumento da amplitude térmica diária. O método de Hargreaves-Samani, ao incorporar explicitamente a diferença entre temperaturas máximas e mínimas, responde de forma sensível a esse aumento, capturando o processo de aridificação atmosférica projetado para o verão mediterrânico. Nessas condições, a atmosfera apresenta maior capacidade de extração de água, impondo uma pressão evaporativa mais intensa sobre a superfície terrestre.

Do ponto de vista agrônomo, o aumento da ET_0 implica que, para um dado coeficiente cultural e sob ausência de limitações hídricas, a cultura estará sujeita a um ambiente de maior demanda evaporativa, exigindo maior aporte de água via irrigação para evitar estresse hídrico. Embora a ET_c do milho não atinja os 1.200 mm, o incremento da ET_0 desloca todo o balanço hídrico do sistema, elevando a Necessidade Líquida de Irrigação e reduzindo a margem de segurança frente a falhas no suprimento hídrico, especialmente em cenários de precipitação estival reduzida ou irregular.

Do ponto de vista espacial, os resultados indicam ainda uma expansão para norte das condições de elevada demanda evaporativa. Regiões que, no período histórico, apresentavam ET_0 moderada passam a exibir, no cenário RCP 8.5, valores comparáveis àqueles anteriormente restritos às regiões mais áridas do Sul do país, sugerindo uma reconfiguração das zonas agroclimáticas e das condições de aptidão para culturas exigentes em água.

4.1.4 Necessidade de irrigação e aptidão agrícola

A Figura 11, ilustra a distribuição espacial da NRL acumulada durante o ciclo cultural do milho (maio a setembro), evidenciando o agravamento da pressão hídrica imposto pelos cenários de alterações climáticas. No período histórico (1980–2005), observa-se uma diferença clara no sentido norte-sul. As regiões a norte Montejunto-Estrela apresentam, na sua maioria, exigências hídricas moderadas (200–350 mm), permitindo que a cultura do milho beneficie da precipitação primaveril e de temperaturas mais amenas. Em contraste, o Alentejo e o Algarve já manifestavam, neste período de referência, necessidades superiores a 450 mm, refletindo a carência hídrica estrutural do clima mediterrânico durante o estio (ALLEN et al., 1998; IPMA, 2025).

As projeções climáticas revelam uma rutura progressiva deste padrão. Sob o cenário RCP 4.5 (estabilização), verifica-se uma expansão das áreas de maior exigência hídrica em direção ao litoral centro. Contudo, é no cenário RCP 8.5 (2071–2100) que o impacto se torna crítico. Os resultados mostram uma homogeneização das necessidades de rega em níveis elevados em quase todo o território, com o desaparecimento das zonas de baixa exigência na região do Minho. Na região Sul, e especificamente no interior do Baixo Alentejo, as necessidades ultrapassam os limiares de 550–600 mm por ciclo. Este aumento deve-se à combinação entre o incremento da evapotranspiração de referência (ET_o) e a redução da precipitação efetiva, corroborando as tendências de aridificação identificadas para a Península Ibérica por Rolim et al. (2017) e Soares et al. (2017).

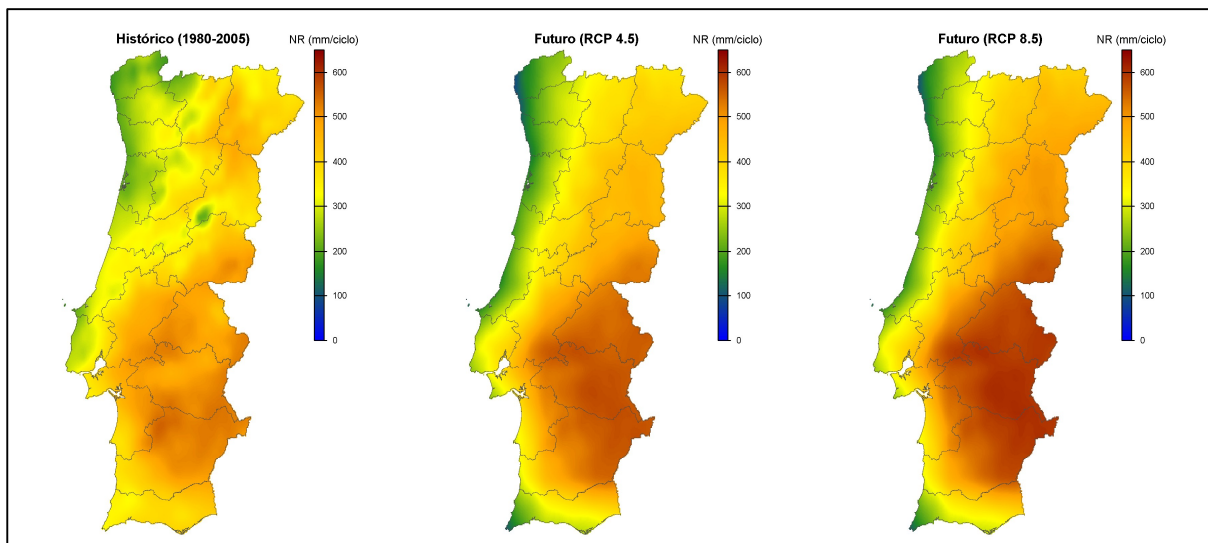


Figura 11 - Distribuição espacial da Necessidade Líquida de Rega (NRL) acumulada durante o ciclo cultural do milho (maio a setembro) em Portugal Continental. Comparação entre a climatologia histórica (1980–2005) e as projeções para o final do século (2071–2100) sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Fonte: Elaboração própria (2025).

A viabilidade agrônômica é apresentada na Figura 12, que classifica o território nacional em classes de aptidão agrícola para a irrigação.

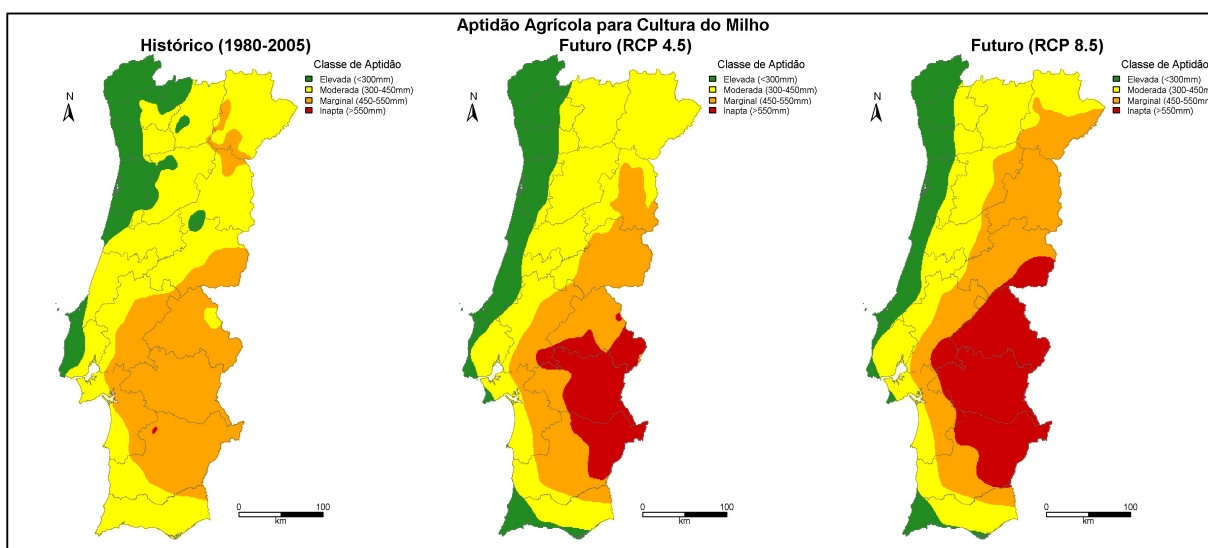


Figura 12 - Distribuição espacial das classes de aptidão agrícola para a cultura do milho irrigado em Portugal Continental, baseada na Necessidade de Rega (NR). A classificação divide-se em: Aptidão Elevada (NR < 300 mm), Moderada (300–450 mm), Marginal (450–550 mm) e inapta (NR > 550 mm). A comparação inclui o período Histórico (1980–2005) e as projeções futuras para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (2071–2100).

Fonte: do próprio autor (2025).

A reclassificação espacial demonstra que a sustentabilidade da cultura do milho está fortemente ameaçada no final do século XXI sob o cenário de emissões elevadas. No cenário histórico, o país apresentava extensas áreas de aptidão "Elevada" (verde) e "Moderada" (amarelo), concentradas no Norte e Centro, onde a

rega funcionava maioritariamente como complemento. As zonas de aptidão "Marginal" estavam confinadas ao interior do Alentejo. No entanto, as projeções para o cenário RCP 8.5 indicam uma transição severa das classes de aptidão:

1. Expansão da Inaptidão: Surge uma vasta mancha de inaptidão (classificada a vermelho, $NRL > 550 \text{ mm}$) que abrange quase a totalidade do Alentejo e partes da Beira Interior. Nestas zonas, a necessidade de volumes de água bruta estimados superiores a $7.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ torna a cultura economicamente inviável devido aos elevados custos energéticos e à incerteza na disponibilidade de água nas reservas (PAULO; PINTO, 2014).
2. Migração da Aptidão: Observa-se um deslocamento das zonas de aptidão "Elevada" e "Moderada" para as regiões de maior latitude e altitude. O que historicamente era considerado aptidão "Elevada" no Minho passa a classificar-se maioritariamente como "Moderada", enquanto as zonas centrais transitam para "Marginal".

Estes resultados sugerem que a manutenção das atuais áreas de produção de milho exigirá um esforço de adaptação significativo. O aumento da NRL implica não apenas uma maior pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos e superficiais, mas também um desafio à eficiência dos sistemas de rega. Conforme apontado por Fraga et al. (2016), sem estratégias de adaptação — como a antecipação de datas de sementeira ou a utilização de variedades de ciclo mais curto — a produção intensiva de milho nas regiões do Sul de Portugal poderá tornar-se insustentável antes do final do século.

3 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu quantificar os impactos das alterações climáticas na cultura do milho em Portugal Continental, confirmando a elevada vulnerabilidade dos sistemas irrigados aos cenários de aquecimento global. A análise espacial evidenciou que o aumento da temperatura média e a redução da precipitação primaveril conduzirão a um incremento substancial da Evapotranspiração de Referência (ET_0). Consequentemente, as Necessidades Líquidas de Rega (NRL) deverão aumentar significativamente. No cenário mais gravoso (RCP 8.5), as necessidades hídricas no final do século poderão superar os 600 mm na região do Alentejo, valores que comprometem a sustentabilidade económica e ambiental da cultura.

Observou-se uma reconfiguração das classes de aptidão agrícola: as zonas de aptidão elevada, atualmente presentes no Minho e litoral Centro, tendem a regredir ou migrar para norte, enquanto o Sul do país caminha para uma situação de inaptidão devido à excessiva procura evapotranspirativa.

Como trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de estratégias de adaptação, como a antecipação da data de sementeira ou o uso de variedades de ciclo mais curto, bem como a análise económica detalhada do custo da água face à produtividade esperada nestes novos cenários climáticos.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Richard G.; PEREIRA, Luis S.; RAES, Dirk; SMITH, Martin. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANPROMIS – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE MILHO E SORGO. Estatísticas da cultura do milho em Portugal. Lisboa, 2024. Disponível em: <https://www.anpromis.pt>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- DASTANE, N. G. Effective rainfall in irrigated agriculture. Rome: FAO, 1974. 62 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 25).
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).
- EDIA – EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO E INFRA-ESTRUTURAS DO ALQUEVA. O Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva. Beja, 2024. Disponível em: <https://www.edia.pt>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- FRAGA, Helder et al. Modeling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global Change Biology*, Oxford, v. 22, n. 11, p. 3774-3788, 2016.
- GIORGI, Filippo; JONES, Colin; ASRAR, Ghassem R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*, Geneva, v. 58, n. 3, p. 175-183, 2009.
- HARGREAVES, George H.; SAMANI, Zohrab A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.
- HIJMANS, Robert J. terra: Spatial Data Analysis. R package version 1.7-71. 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=terra>.
- IACA – ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS INDUSTRIAIS DE ALIMENTOS COMPOSTOS PARA ANIMAIS. **Relatórios e Estatísticas**. Lisboa, 2025. Disponível em: <https://www.iaca.pt>. Acesso em: fev. 2025.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA – IPMA. **Normais Climatológicas**. Lisboa, 2025. Disponível em: <https://www.ipma.pt>. Acesso em: fev. 2025.
- IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
- IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- JACOB, Daniela et al. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, Berlin, v. 14, n. 2, p. 563-578, 2014.
- NYCHKA, Douglas et al. **fields: Tools for Spatial Data**. R package version 15.2. Boulder: University Corporation for Atmospheric Research, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=fields>.
- PAULO, Ana A.; PINTO, Joaquim G. Future changes in precipitation and drought characteristics in the Alentejo region (Portugal). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Amsterdam, v. 72, p. 44-53, 2014.
- PEBESMA, Edzer J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 7, p. 683-691, 2004.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

ROLIM, João et al. Impacts of Climate Change on Irrigated Agriculture in Southern Portugal. *Irrigation and Drainage*, Hoboken, v. 66, n. 1, p. 3-10, 2017.

SANTOS, Filipe Duarte; FORBES, K.; MOITA, R. (Ed.). Alterações climáticas em Portugal: cenários, impactos e medidas de adaptação - Projecto SIAM. Lisboa: Gradiva, 2002.

SAXTON, Keith E. et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 50, n. 4, p. 1031-1036, 1986.

SAXTON, Keith E.; RAWLS, Walter J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 70, n. 5, p. 1569-1578, 2006.

SHAHIDIAN, S. et al. Hargreaves and other reduced-set methods for calculating evapotranspiration. In: IRMÁK, A. (Ed.). **Evapotranspiration: Remote Sensing and Modeling**. Rijeka: InTech, 2012. p. 59-80.

SOARES, Pedro M. M. et al. Future precipitation in Portugal: high-resolution projections using WRF model and EURO-CORDEX multi-model ensembles. *Climate Dynamics*, Berlin, v. 49, n. 7-8, p. 2503-2530, 2017.

STEDUTO, Pasquale et al. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo; MOLLER, Ian Max; MURPHY, Angus. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TRAJKOVIC, Slavisa. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 133, n. 1, p. 38-42, 2007.

TRNKA, Miroslav et al. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology*, Oxford, v. 17, n. 7, p. 2298-2318, 2011.

VAN VUUREN, Detlef P. et al. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, Dordrecht, v. 109, n. 1-2, p. 5-31, 2011.

WICKHAM, Hadley; BRYAN, Jennifer. **readxl: Read Excel Files**. R package version 1.4.3. 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>.