



ESCOLA DE DOUTORAMENTO
INTERNACIONAL DA USC

Simão
Pedro Alves da Silva

Tese de doutoramento

Adaptação da *Vitis vinifera* às alterações
climáticas na Região dos Vinhos Verdes

Lugo, 2025

TESE DE DOUTORAMENTO

**ADAPTAÇÃO DA *VITIS*
VINIFERA ÀS ALTERAÇÕES
CLIMÁTICAS NA REGIÃO DOS
VINHOS VERDES**

Simão Pedro Alves da Silva

Directores: Maria Isabel Valín Sanjjiao; Javier José Cancela Barrio

Titor: Javier José Cancela Barrio

PROGRAMA DE DOUTORAMENTO EN ENXEÑARÍA PARA O DESENVOLVEMENTO RURAL E
CIVIL

LUGO

2025

Declaro não ter nenhum conflito de interesse em relação com a tese de doutoramento.

AGRADECIMENTOS

*Se eu vi mais longe,
foi por estar sobre ombros
de gigantes. - Isaac Newton*

A conclusão desta tese representa para mim não apenas o fim de um ciclo académico, mas também o resultado de um percurso feito de etapas ora mais animadoras ora mais desafiantes. Esta caminhada só foi possível com o apoio e presença de pessoas muito especiais, a quem quero deixar o meu mais profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, aos meus orientadores Maria Isabel Valín Sanjiao e Javier José Cancela Barrio, pela confiança depositada em mim desde o primeiro dia em que falamos deste percurso (II Simpósio Ibérico de Engenharia Hortícola), pela paciência, pelas críticas construtivas e pela orientação que ultrapassou muitas vezes o plano científico. A dedicação destes orientadores bem como o incentivo foram fundamentais para que este percurso chegasse até ao fim.

Agradeço ao coordenador Programa de Doutoramento em Enxeñaría para o Desenvolvimento Rural e Civil, professor Jorge Dafonte, bem como aos serviços académicos da Universidade de Santiago de Compostela, que foram incansáveis na resposta a todas as minhas dúvidas.

Aos professores, funcionários e amigos da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, obrigado pelos momentos em que me auxiliaram neste trabalho, pelo companheirismo nos dias mais longos e pelo apoio que tornou este caminho mais leve. Agradeço em especial aos Professores Susana Mendes e Claudio Paredes, coautores dos artigos publicados durante este percurso pois a ajuda e apoio por eles prestado foi fundamental para o meu sucesso.

Obrigado aos meus pais, Lúcia e Francisco, bem como aos meus irmãos Esperança, César e Marta, que sempre acreditaram em mim e me transmitiram os valores da perseverança e do esforço.

Obrigado à minha noiva [quase esposa] Juliana Barros, pelo amor incondicional, pela paciência e pela força nos momentos em que mais precisei.

Por fim, agradeço a todos os amigos que, com palavras de incentivo, simples gestos de carinho, me ajudaram a carregar esta mochila de estados emocionais nesta longa, mas recompensante caminhada.

O meu coração transborda de alegria quando recordo todos aqueles que fizeram parte deste caminho.

RESUMO

As alterações climáticas constituem uma ameaça crescente na viticultura atlântica, na qual se insere a Região dos Vinhos Verdes, sobretudo pelo impacto negativo que exercem na disponibilidade de água para rega. Nesse contexto complexo, que são as alterações climáticas, a implementação de estratégias de rega que visem o uso eficiente da água constitui uma abordagem essencial para mitigar os efeitos do défice hídrico e garantir a produtividade e qualidade das uvas. Para avaliar o impacto de diferentes estratégias de rega, estudou-se a produtividade da água e a resposta fisiológica da *Vitis vinifera* L., cv. Loureiro e cv. Alvarinho, em condições de sequeiro (sem rega), rega deficitária e rega total. Os estudos foram conduzidos em duas vinhas comerciais com solos franco-arenosos ambas caracterizadas por um clima atlântico. Foram utilizadas sondas capacitivas para monitorizar o teor de água no solo, câmaras de pressão para medir o potencial hídrico do ramo (SWP) e estações meteorológicas para recolha de dados climáticos. A evapotranspiração da cultura real ($ET_{c\ act}$), a transpiração (T), os coeficientes basais (K_{cb}) e o coeficiente de evaporação do solo (K_e) foram estimados por simulação diária no modelo SIMDualKc, baseado na abordagem dos coeficientes culturais duais.

Os resultados apontam para uma forte sazonalidade na produtividade, com variações entre ciclos culturais significativas. A estratégia de rega deficitária apresentou em ambos os cultivares os melhores índices de produtividade da água, mantendo níveis adequados de qualidade do mosto. Diferenças estatisticamente significativas foram registadas sobretudo em anos mais secos ou com maior défice hídrico, evidenciando que a estratégia sem rega conduziu a maior stress hídrico. Já a estratégia de rega total, embora tenha conduzido a incrementos na produção, resultou em algumas situações numa ligeira redução do teor alcoólico provável.

Com base nesta metodologia e nos resultados obtidos podemos concluir que a rega deficitária é a estratégia mais sustentável para a viticultura atlântica, equilibrando produtividade e qualidade. Além disso, o modelo SIMDualKc, após devidamente calibrado e validado, mostrou-se uma ferramenta eficaz para a estimativa do balanço hídrico da cultura e para apoiar a gestão eficiente da rega dos viticultores.

Palavras-chave: eficiência do uso da água, modelo SIMDualKc, potencial hídrico do ramo, qualidade do mosto, estratégias de rega

RESUMEN

El cambio climático representa una amenaza creciente para la viticultura atlántica, incluida la región de ‘Vinho Verde’, en particular debido a su impacto negativo en la disponibilidad de agua para riego. En este complejo contexto de cambio climático, la implementación de estrategias de riego orientadas al uso eficiente del agua es esencial para mitigar los efectos del déficit hídrico y garantizar la productividad y la calidad de la uva.

Para evaluar el impacto de diferentes estrategias de riego, se evaluaron la productividad hídrica y la respuesta fisiológica de *Vitis vinifera* L., cv. Loureiro y cv. Alvarinho, en condiciones de secano (sin riego), riego deficitario y riego completo. Los estudios se realizaron en dos viñedos comerciales con suelos franco-arenosos, ambas caracterizadas por condiciones de clima atlántico. Se utilizaron sondas capacitivas para monitorizar el contenido de agua del suelo, cámaras de presión para medir el potencial hídrico de tallo (SWP) y estaciones meteorológicas para recopilar datos climáticos. La evapotranspiración real del cultivo ($ET_{c\ act}$), la transpiración (T), los coeficientes basales (K_{cb}) y el coeficiente de evaporación del suelo (K_e) se estimaron mediante simulaciones diarias utilizando el modelo SIMDualKc, basado en el enfoque de coeficientes duales del cultivo.

Los resultados indican una marcada estacionalidad en la productividad, con importantes variaciones interanuales. La estrategia de riego deficitario presentó los mejores índices de productividad hídrica para ambos cultivares, manteniendo niveles adecuados de calidad del mosto. Se registraron diferencias estadísticamente significativas principalmente en los años más secos o con mayor déficit hídrico, lo que demuestra que la estrategia de secano provocó un mayor estrés hídrico. La estrategia de riego completo, si bien condujo a un aumento de la producción, resultó en algunos casos en una ligera reducción del contenido alcohólico probable.

Con base en la metodología aplicada y los resultados obtenidos, podemos concluir que el riego deficitario es la estrategia más sostenible para la viticultura atlántica, equilibrando productividad y calidad. Además, el modelo SIMDualKc, tras su correcta calibración y validación, demostró ser una herramienta eficaz para estimar el balance hídrico del cultivo y facilitar la gestión eficiente del riego para los viticultores.

Palabras clave: eficiencia en el uso del agua, modelo SIMDualKc, potencial hídrico de tallo, calidad del mosto, estrategias de riego.

ABSTRACT

Climate change poses an increasing threat to Atlantic viticulture, particularly in the “Vinhos Verdes” region, due to its negative impact on irrigation water availability. In this challenging context, the implementation of irrigation strategies that promote efficient water use is essential to mitigate water deficits and to safeguard both grape yield and quality. To evaluate the effects of different irrigation regimes, the water productivity and physiological responses of *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro and cv. Alvarinho were assessed under rainfed (no irrigation), deficit irrigation, and full irrigation conditions. The trials were conducted in two commercial vineyards with sandy loam soils, both located in an Atlantic climate region. Soil water content was monitored using capacitive probes, stem water potential (SWP) was measured with a pressure chamber, and climatic data were collected from weather stations. Actual crop evapotranspiration ($ET_{c\ act}$), transpiration (T), basal crop coefficient (K_{cb}), and soil evaporation coefficient (K_e) were simulated daily with the SIMDualKc model, based on the dual crop coefficient approach.

The results revealed strong seasonal patterns in productivity, with marked growing seasons variability. Deficit irrigation provided the highest water productivity indices for both cultivars, while maintaining suitable levels of must quality. Statistically significant differences were observed mainly in drier years, highlighting that rainfed conditions led to greater water stress. Full irrigation increased yield but in some instances was associated with a slight reduction in probable alcohol content.

Overall, the findings indicate that deficit irrigation represents the most sustainable strategy for Atlantic viticulture, achieving a balance between productivity and grape quality. Moreover, the SIMDualKc model, once calibrated and validated, proved to be a reliable tool for estimating crop water balance and for supporting efficient irrigation management in viticultural systems.

Keywords: water use efficiency, SIMDualKc model, stem water potential, must quality, irrigation treatments

ÍNDICE

| | |
|--|-------|
| Agradecimentos | v |
| Resumo | vii |
| Resumen | ix |
| Abstract | xi |
| Índice | xiii |
| Publicações derivadas desta tese | xv |
| Lista de abreviaturas e símbolos | xvii |
| Índice de figuras | xix |
| Índice de quadros..... | xxi |
| Resumo ampliado | xxiii |
| 1 Introdução..... | 1 |
| 1.1 A Região dos “Vinhos Verdes” | 2 |
| 1.1.1 A sub-região do Lima | 4 |
| 1.1.2 A sub-região de Monção e Melgaço..... | 5 |
| 1.2 Os impactos das alterações climáticas na <i>Vitis vinifera</i> | 6 |
| 1.3 Estimativa das necessidades hídricas da <i>Vitis vinifera</i> | 7 |
| 1.4 Justificação e coerência da tese | 8 |
| 1.5 Estrutura da tese..... | 9 |
| 2 Hipóteses e objetivos | 11 |
| 3 Ferramentas Metodológicas..... | 13 |
| 4 Publicações | 19 |
| 4.1 Dual crop coefficient approach in <i>Vitis vinifera</i> L. cv. Loureiro | 19 |
| 4.2 Water productivity in <i>Vitis vinifera</i> L. cv. Alvarinho using dual crop coefficient approach | 37 |
| 4.3 Agronomic and must quality performance of <i>Vitis vinifera</i> L. cv. Loureiro: a four-year study..... | 53 |
| 5 Discussão | 69 |
| 5.1 Desenho experimental e avaliação metodológica..... | 69 |
| 5.2 Gestão da água e impactos climáticos nos cultivares Loureiro e Alvarinho | 71 |
| 5.3 Impacto do solo e da cobertura no balanço hídrico do solo | 74 |
| 5.4 Modelação do balanço hídrico do solo com SIMDualKc..... | 76 |
| 5.5 Inclusão do SWP e do SIMDualKc no balanço hídrico | 79 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.6 | Coefficiente cultural basal nas cv. Loureiro e cv. Alvarinho | 81 |
| 5.7 | Produtividade e eficiência do uso da água | 82 |
| 5.8 | Resposta da videira à variabilidade climática e estratégias de rega | 83 |
| 6 | Conclusões..... | 85 |
| 7 | Bibliografia | 87 |

PUBLICAÇÕES DERIVADAS DESTA TESE

No corpo desta tese incluem-se três artigos científicos, correspondentes aos capítulos 4.1, 4.2 e 4.3, que são citados segundo a sua ordem de publicação.

Silva, S. P., Valín, M. I., Mendes, S., Araujo-Paredes, C., & Cancela, J. J. (2021). Dual Crop Coefficient Approach in *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro. *Agronomy*, 11(10), 2062. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102062> (Fator de impacto, IF: 3.949; Primeiro quartil (Q1; 16/88) da categoria (Agronomy). Citações: 17)

Silva, S. P., Valín, M. I., Mendes, S., Araujo-Paredes, C., & Cancela, J. J. (2024). Water productivity in *Vitis vinifera* L. cv. Alvarinho using dual crop coefficient approach. *Agricultural Water Management*, 303 (February). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109027> (Fator de impacto, IF: 6.4; Primeiro quartil (Q1; 4/129) desta categoria (Agronomy). Citações: 2.)

Silva, S. P., Valín, M. I., Mendes, S., Araujo-Paredes, C., & Cancela, J. J. (2025). Agronomic and must quality performance of *Vitis vinifera* L. cv. 'loureiro': A four-year study. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 40 (July). <https://doi.org/10.1051/ctv/ctv2025400163> (Fator de impacto, IF (2024): 0.9; Terceiro quartil (Q3) desta categoria (Agronomy))

Todos eles foram publicados como artigos de acesso aberto sob uma licença Creative Commons (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite a sua utilização irrestrita, distribuição e reprodução em qualquer meio ou formato, para qualquer fim, sem necessidade de permissão específica.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- a, b – Parâmetros da curva de drenagem/infiltração (Kostiakov)
AAE – Erro absoluto médio [mm]
AGC- Cobertura vegetal ativa
ANOVA – Análise de variância
ASW – Água disponível no solo [mm]
BI – Índice de Branhas
CI – Índice de noites frias
CN – Número de escoamento
cv. – cultivar
CVRVV – Comissão de Viticultura da Região dos Vinhos Verdes
DI – Rega deficitária
dIA – Índice de concordância
DOP – Denominação de Origem Protegida
EC_a – Condutividade elétrica aparente [mS m^{-1}]
EF – Eficiência do modelo
ET_c – Evapotranspiração da cultura [mm]
ET_{c act} – Evapotranspiração da cultura real [mm]
ET_o – Evapotranspiração de referência [mm]
fc – Fração do solo coberto pela cultura
few – Fração de solo humedecido exposto à radiação solar direta
FI ou I – Rega total
Fr – Fração de superfície molhada pelo sistema de rega
GY – Produção de uva ou produtividade [kg ha^{-1} ou t ha^{-1}]
h – Altura da planta [m]
HI – Índice de Huglin
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas
IVV – Instituto da Vinha e do Vinho
K_{cb} – Coeficiente cultural basal
K_{cb end} – Coeficiente cultural basal no fim do ciclo cultural
K_{cb cover} – Coeficiente basal da cobertura vegetal ativa
K_{cb ini} – Coeficiente cultural basal no início do ciclo cultural
K_{cb mid} – Coeficiente cultural basal no meio do ciclo cultural
K_s – Coeficiente de Stress Hídrico
ML – Parâmetro multiplicador aplicado à fração de cobertura efetiva do solo
OIV – Organização Internacional da Vinha e do Vinho
p – Fração de depleção de água no solo
PBIAS – Viés percentual [%]
R – Sequeiro
RAW – Água facilmente disponível na zona radicular [mm]
REW – Água facilmente evaporável [mm]
RMSE – Erro quadrático médio [mm]
SWC – Teor de água no solo [mm]

SWP – Potencial hídrico do ramo [MPa]

T – Transpiração [mm]

TAW – Água disponível total na zona radicular [mm]

TEW – Água evaporável total [mm]

TWU – Água total utilizada [mm]

WI – Índice de Winkler

WP – Produtividade da água (rega e precipitação) [kg m^{-3}]

WP_{ET} – Produtividade da água por evapotranspiração [kg m^{-3}]

WP_T – Produtividade da água por transpiração [kg m^{-3}]

WP_{TWU} – Produtividade da Água total utilizada (precipitação, armazenamento de água no solo, ascensão capilar e rega aplicada) [kg m^{-3}]

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Regiões Vitivinícolas de Portugal Continental. Fonte da shapefile: (IVV, 2023) | 2 |
| Figura 3.1 - Localização das parcelas dos estudos (Fonte: Elaboração Própria) | 13 |
| Figura 3.2 - Workflow metodológico para o estudo dos efeitos da rega nos cultivares Alvarinho e Loureiro da <i>Vitis vinifera</i> L. (Fonte: Elaboração Própria) | 17 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 3.1 - Comparação de Metodologias entre Estudos | 16 |
|---|----|

RESUMO AMPLIADO

A “Região dos Vinhos Verdes” posúe unha tradición vitícola e unha identidade cultural fundamente enraizada que na actualidade afronta presións cada vez máis intensas asociadas ás alteracións climáticas. Ao longo das últimas décadas, a evidencia científica acumulada demostrou que as mudanzas nos réximes de precipitación, o aumento das temperaturas medias, así como a maior frecuencia de fenómenos extremos veñen desafiando a resiliencia da *Vitis vinifera* L. en todas as actuais rexións de produción de viño. No caso específico do noroeste de Portugal, onde o clima atlántico foi o factor estruturante da paisaxe vitivinícola e das prácticas agrícolas, as condicións de sequeiro que sustentaron durante séculos a viticultura dos Vinhos Verdes amósanse cada vez máis fráxiles. Esta fragilidade tradúcese tanto na inestabilidade produtiva, con oscilacións significativas na cantidade de uvas obtidas de ano en ano, como na vulnerabilidade da calidade enolóxica, que depende de equilibrios delicados entre azúcores, acidez, compostos aromáticos e fenólicos. O risco de desaxustes entre o calendario fenolóxico e a dispoñibilidade hídrica impónse como un dos maiores desafíos para a sustentabilidade deste sector.

O estudo da adaptación da vide á contorna climática emerxente esixe abordaxes integradas que combinen a experimentación no campo coa monitorización fisiolóxica e coa modelización do balance hídrico do solo. Esta combinación permite non só observar os efectos directos da variabilidade climática sobre a planta e o solo, senón tamén anticipar escenarios futuros e probar estratexias de mitigación. Entre os cultivares desta subrexión, Loureiro e Alvarinho destacan non só pola expresión que posúen na produción e na exportación, senón tamén polas súas características fisiolóxicas distintas, que os converten en modelos axeitados para comprender a diversidade de respostas posibles fronte ao déficit hídrico. O cv. Loureiro, amplamente cultivado en varias subrexións e asociado a viños de frescura e alta acidez, presenta unha arquitectura de copa e un vigor vexetativo que condicionan a súa transpiración e a súa relación coa dispoñibilidade da auga no solo. O Alvarinho, concentrado sobre todo en Monção e Melgaço, é internacionalmente recoñecido pola súa intensidade aromática e pola súa aptitude para viños de garda, características que dependen fortemente da regulación da auga durante a maduración. Estudiar estes dous cultivares en paralelo fornece, por tanto, unha visión abrangente da viticultura atlántica baixo presión climática.

A hipótese de que a viticultura de sequeiro, malia a súa relevancia histórica, xa non é suficiente para garantir a estabilidade produtiva na “Região dos Vinhos Verdes” está hoxe confirmada por múltiples autores. Ensaio de campo conducidos ao longo de varios anos demostraron que, mesmo en anos considerados climaticamente “normais”, a ausencia de rega resulta con frecuencia en estrés moderado a severo durante fases críticas como a floración ou a maduración. Ese estrés tradúcese nunha redución do número de acios por vide, na diminución da masa dos bagos e en alteracións na composición do mosto, que poden comprometer a acidez desexada nos “Vinhos Verdes” brancos. A variabilidade interanual observada nestes parámetros reforza a idea de que confiar unicamente no réxime pluviométrico natural constitúe unha aposta de alto risco nun contexto no que a irregularidade das chuvias tende a aumentar. En anos de precipitación reducida, o sequeiro leva inevitabelmente a quebras de produción, mentres que en anos de elevada precipitación, sobre todo no inverno, a recarga do solo non é suficiente para soste as fases de crecemento da viña.

Fronte a esta constatación, a implementación de estratexias de rega xorde como unha alternativa que procura equilibrar produtividade e sustentabilidade. As dotacións de rega deben axustarse ás fases fenolóxicas máis críticas, para mitigar o estrés nos momentos de maior impacto fisiolóxico e enolóxico, aceptando un nivel moderado de déficit en períodos menos sensibles. Os estudos realizados con Loureiro e Alvarinho, presentes nesta tese, confirman que mesmo estratexias de rega deficitarias non comprometen a calidade da uva; pola contra, poden mesmo favorecer a concentración de compostos de interese ao limitar o exceso de vigor vexetativo e ao promover un balance máis eficiente entre crecemento e frutificación. Verificouse aínda que a rega deficitaria aumenta de forma consistente a eficiencia no uso da auga, medida como a relación entre produción obtida e volume de auga efectivamente utilizado, incluíndo precipitación, rega e reservas de auga do solo.

Por outra banda, avalíouse o potencial hídrico do tronco ao mediodía solar, o cal se revelou como un indicador sensíbel do estado da planta, permitindo distinguir entre tratamentos de rega. Os ensaios co cv. Loureiro amosaron que, en sequeiro, a vide supera con frecuencia o limiar de estrés moderado, sobre todo en anos secos, mentres que na rega deficitaria manténse nunha faixa de estrés lixeiro a moderado, que non compromete a fisioloxía e protexe a produtividade. No caso do Alvarinho, os valores de estrés en sequeiro foron menos negativos, o que suxire unha maior resiliencia deste cultivar, pero aínda así a rega deficitaria permitiu un control máis eficaz da transpiración e unha maior estabilidade interanual.

A modelización a través do SIMDualKc foi determinante para comprender o balance hídrico do solo e cuantificar as necesidades hídricas reais. Este modelo, baseado no método dos coeficientes de cultivo duais proposto pola FAO, separa a evapotranspiración total en transpiración da cultura e evaporación do solo. Nos sistemas vitícolas atlánticos, nos que a cuberta do solo por vexetación espontánea é unha constante, esta separación é particularmente relevante, porque a evaporación das entreliñas pode representar unha fracción significativa das perdas totais. Ao calibrar o modelo con datos de sequeiro no primeiro ano, asegurouse que os parámetros axustados reflectían o comportamento intrínseco do sistema, sen o sesgo da rega. A validación posterior, con datos de anos e tratamentos diferentes, confirmou a robustez do modelo, evidenciando correlacións case perfectas entre a auga do solo observada e a simulada. Este nivel de precisión dá confianza para utilizar o modelo como ferramenta de apoio á decisión da rega.

A caracterización climática realizada mediante índices bioclimáticos reforzou a comprensión do impacto das alteracións recentes e proxectadas. O índice de Winkler situou as áreas de estudo na Rexión II–III, correspondente a climas moderadamente quentes, mentres que o índice de Huglin confirmou unha clasificación de clima temperado cálido. Os índices de noites frías revelaron temperaturas nocturnas axeitadas para a preservación da frescura aromática. A conxunción destes indicadores amosa que, aínda que as condicións actuais aínda permiten a produción de viños co perfil típico dos Viños Verdes, tendo en conta os escenarios proxectados a adaptación será inevitábel. Modelos climáticos baseados en diferentes traxectorias de emisións (RCPs) suxiren que, até o final do século, poderá verificarse unha diminución da precipitación anual superior ao 40 % e aumentos de temperatura que, en escenarios máis extremos, superarán os 6 °C en comparación co período histórico.

Un dos elementos centrais na comprensión da dinámica da auga no sistema vitícola é a caracterización detallada do solo e da súa interacción coa vide. Os solos onde decorreran os estudos, clasificados como regosolos eútricos, posúen unha textura franco-arenosa que condiciona fortemente a capacidade de almacenamento hídrico. O elevado contido de area confírelles boa drenaxe, pero tamén reduce a capacidade de retención de auga dispoñíbel para as raíces. Os valores medidos de capacidade de campo e coeficiente de murcha, obtidos por

ensaios de placa de presión, revelaron disponibilidades totais de auga entre 100 e 113 mm até unha profundidade de 0,8 metros, que corresponde ao volume principal explorado polas raíces da vide. Este volume, aínda que suficiente en anos húmidos ou de precipitación regular, é claramente insuficiente en anos de seca prolongada, o que xustifica a necesidade de prácticas de xestión da rega que permitan maximizar a eficiencia no uso da auga. A instalación de sondas capacitivas Diviner 2000, distribuídas en diferentes puntos das parcelas e en profundidade até 80 cm, posibilitou a obtención de perfís verticais e temporais detallados do contido de auga no solo, fundamentais para calibrar o modelo SIMDualKc e para axustar as decisións de rega.

Outro factor decisivo para a interpretación do balance hídrico foi a cuberta vexetal activa entre liñas, composta maioritariamente por gramíneas espontáneas. Esta vexetación desempeña funcións ecosistémicas relevantes, como a protección contra a erosión, o secuestro de carbono e a promoción da biodiversidade, pero representa tamén unha compoñente significativa da evapotranspiración total. A monitorización da densidade e da altura desta cuberta ao longo do ciclo vexetativo amosou variacións acentuadas entre anos e tratamentos, influenciadas pola frecuencia de corte e polas condicións meteorolóxicas. O modelo SIMDualKc incorporou estes datos a través do coeficiente basal de cuberta, permitindo distinguir a transpiración da vide da evaporación da cuberta. Esta distinción resultou fundamental, sobre todo nos tratamentos de rega deficitaria, onde a proporción de auga destinada á vide fronte á cuberta condiciona directamente a eficiencia no uso da auga.

A monitorización climática local, a través de estacións meteorolóxicas, forneceu datos diarios de temperatura, humidade relativa, velocidade do vento, radiación solar e precipitación. Estes datos foron utilizados para calcular a evapotranspiración de referencia (ET_o) polo método Penman–Monteith FAO, que constitúe a base para a estimación das necesidades hídricas da cultura. Os resultados amosaron padróns estacionais típicos do clima atlántico, con ET_o baixa no inverno e elevada no verán, pero tamén revelaron grande variabilidade interanual. Esta amplitude interanual, cando se conxuga coa irregularidade intraanual da precipitación, confirma a vulnerabilidade da viticultura de sequeiro e reforza a necesidade de axustar a rega en función das condicións específicas de cada fase de crecemento da viña.

A comparación con outras rexións vitícolas atlánticas ou mediterráneas revela que a problemática que afronta a “Região dos Vinhos Verdes” non é única. En varias rexións do sur de Europa, a introdución de estratexias de rega deficitaria xa demostrou ganancias significativas en eficiencia hídrica e calidade. Porén, a especificidade atlántica, caracterizada por elevada pluviometría no inverno e déficits marcados no verán, esixe adaptacións propias. Mentres que en rexións mediterráneas a rega se asume como práctica corrente e case obrigatoria, nos “Vinhos Verdes” o desafío é conciliar unha tradición de sequeiro coa necesidade crecente de intervir para estabilizar a produción. Os resultados aquí presentados demostran que tal conciliación é posíbel, sempre que se basee en prácticas de rega deficitaria fundamentadas cientificamente e apoiadas en ferramentas de monitorización e modelización robustas.

Desde o punto de vista metodolóxico, os ensaios en Loureiro e Alvarinho foron conducidos con tres estratexias de rega distintas: sequeiro, rega deficitaria e rega total. Cada tratamento foi replicado catro veces, garantindo robustez estatística e control da variabilidade espacial. O uso de sistemas de rega localizada autocompensantes asegurou a precisión na aplicación das dotacións de auga e reduciu perdas por deriva ou por infiltración desigual. Nos tratamentos de rega deficitaria aplicáronse volumes correspondentes ao 25–50 % das dotacións da rega total, axustados en función dos limiares de humidade do solo. A rega total representaba o rego aplicado polo viticultor, que dependía da dispoñibilidade de auga e da experiencia do viticultor. Este deseño experimental permitiu comparar de forma rigorosa os efectos das diferentes

estratexias non só no rendemento e na calidade da uva, senón tamén no estado fisiolóxico da vide e na eficiencia no uso da auga.

A avaliación fisiolóxica realizouse mediante medicións regulares do potencial hídrico de tronco (SWP) ao mediodía solar. Os resultados obtidos demostraron que, en sequeiro, o Loureiro acadou con frecuencia valores inferiores a $-1,2$ MPa, correspondentes a estrés moderado a severo. En contrapartida, na rega deficitaria os valores mantivéronse xeralmente entre $-0,8$ e $-1,1$ MPa, indicando estrés lixeiro a moderado. Estes valores sitúanse nunha faixa considerada fisioloxicamente aceptábel, na que a fotosíntese e a transpiración se ven reducidas, mais non comprometidas. O Alvarinho presentou respostas menos severas en sequeiro, con valores de SWP menos negativos (mínimo de $-0,66$ MPa), o que suxire características hidráulicas específicas que lle confiren maior resiliencia. Aínda así, a rega deficitaria amosouse vantaxosa ao estabilizar os valores de SWP e reducir a variabilidade interanual. Estes resultados confirman que o SWP é un indicador fiable e aplicábel na práctica vitícola, e pode utilizarse como criterio para programar regas deficitarias de forma eficiente.

A produtividade e a eficiencia hídrica foron analizadas en detalle con base en indicadores que relacionan o rendemento da cultura con diferentes compoñentes do consumo de auga. Entre os indicadores calculados salientan a produtividade da auga total utilizada (WPTWU), a produtividade asociada só á transpiración (WPT) e a produtividade asociada á evapotranspiración real da cultura (WPET). Estes indicadores permiten distinguir entre a auga aplicada ou recibida globalmente polo sistema e a fracción efectivamente empregada pola vide. Os resultados amosaron que, tanto no cultivar Loureiro como no cultivar Alvarinho, a rega deficitaria conduciu a valores máis elevados de produtividade da auga en comparación co sequeiro, e en moitos casos comparábeis ou mesmo superiores á rega total.

A análise dos parámetros de calidade do mosto revelou que a rega deficitaria non compromete atributos enolóxicos fundamentais, como o teor alcohólico probable, a acidez titulábel e o pH. No caso do cultivar Loureiro, observouse mesmo unha tendencia a maior preservación da acidez baixo rega deficitaria en comparación coa rega total, o que constitúe unha vantaxe para a produción de viños brancos frescos e aromáticos. Estes resultados aliñan coas investigacións realizadas noutras rexións vitícolas, que demostraron que un nivel moderado de estrés hídrico durante a maduración pode aumentar a concentración de azucres e de compostos aromáticos, mellorando o perfil sensorial dos viños. Así, a rega deficitaria preséntase non só como unha estratexia de mitigación do déficit hídrico, senón tamén como unha ferramenta de valorización enolóxica.

A interpretación dos resultados obtidos ao longo de varios anos evidencia tamén a importancia da variabilidade interanual. No cultivar Loureiro, conducido durante catro anos consecutivos, verificouse que as produtividades estiveron fortemente condicionadas polas condicións meteorolóxicas específicas de cada ano. En 2020, por exemplo, as viñas en sequeiro presentaron unha produción superior a 19 toneladas por hectárea, mentres que en 2021, un ano caracterizado por precipitación irregular e temperaturas máis elevadas, a produción en rega total foi inferior a 5 toneladas por hectárea. Esta oscilación ilustra claramente que o impacto da rega non pode interpretarse de forma illada, senón que debe ser analizado en articulación coas condicións meteorolóxicas de cada ano. A interacción entre clima, solo e rega resulta en respostas complexas, que só poden ser debidamente comprendidas mediante estudos plurianuais e modelos que integren múltiples variábeis, tal como o que se presenta nesta tese.

O impacto da rega na calidade das uvas e do mosto foi igualmente variábel entre anos, reflectindo a influencia das condicións meteorolóxicas. Aínda que non se observaron diferencias estatisticamente significativas en todos os parámetros enolóxicos, verificouse que a rega deficitaria contribuíu a manter niveis de acidez máis elevados en anos de maior déficit

hídrico, ao tempo que evitou reducións acentuadas na masa dos bagos e no número de acios. O teor alcohólico probábel mantívose en valores axeitados para a produción de viños brancos, raramente descendendo por baixo do 10 %, e acadando puntualmente valores superiores ao 11 %. Estas observacións corroboran a idea de que a rega deficitaria pode contribuír a preservar o perfil sensorial característico dos Viños Verdes, ao equilibrar produtividade e calidade sen inducir excesos vexetativos.

A calibración do modelo realizouse inicialmente con datos de sequeiro, garantindo que as estimacións reflectían unicamente os procesos naturais de precipitación, infiltración, drenaxe e transpiración. Posteriormente, a validación con datos de rega permitiu probar a robustez do modelo en diferentes tratamentos de rega. Os resultados demostraron unha correlación case perfecta entre a auga do solo observada e a simulada, con valores de r^2 superiores a 0,99, confirmando a alta precisión do modelo. Este nivel de detalle posibilitou tamén a identificación de parámetros específicos de cada cultivar. No cultivar Loureiro, por exemplo, os coeficientes de cultivo basal (K_{cb}) determináronse como 0,33 no inicio da estación, 0,68 no medio e 0,54 ao final, o que reflicte unha planta con desenvolvemento moderado e equilibrio entre vigor vexetativo e reprodutivo. No cultivar Alvarinho, os valores foron máis baixos, respectivamente 0,22, 0,53 e 0,24, traducindo menor densidade de plantación e unha arquitectura de planta diferente. Estas diferenzas subliñan a necesidade de calibrar os modelos de forma específica para cada cultivar e contexto edafoclimático, evitando extrapolacións xeralistas que poden conducir a erros de xestión.

O papel do modelo SIMDualKc na análise destes sistemas non se limitou á estimación da evapotranspiración real da cultura. Ao permitir a separación entre a transpiración da vide, a transpiración da cuberta e a evaporación do solo, o modelo posibilitou identificar de forma máis clara os mecanismos mediante os cales diferentes estratexias de rega afectan o balance hídrico. Nos tratamentos con sequeiro, por exemplo, observouse que a proporción de perdas por evaporación aumentaba significativamente, reducindo a eficiencia global do sistema. Xa nos tratamentos de rega deficitaria, a maior parte da auga aplicada foi utilizada para transpiración produtiva, maximizando o aproveitamento fisiolóxico. Esta capacidade de distinguir fluxos de auga produtivos e non produtivos é unha achega esencial para a xestión sustentábel, porque permite orientar decisións non só con base no volume total de auga utilizado, senón na fracción que efectivamente contribúe ao rendemento.

Outro aspecto relevante foi a análise da resposta fisiolóxica das vides á dispoñibilidade hídrica en termos de transpiración e de eficiencia no uso da auga. Os datos obtidos a través do SIMDualKc amosaron que, a medida que a evapotranspiración de referencia aumentaba durante o verán, as vides en sequeiro reducían drasticamente a transpiración, como resultado do peche estomático inducido polo déficit hídrico. En contrapartida, as vides en rega total mantiveron taxas de transpiración elevadas, pero non sempre acompañadas de ganancias proporcionais en produtividade. A rega deficitaria revelou, unha vez máis, a estratexia máis equilibrada, permitindo taxas moderadas de transpiración que sostiñan a fotosíntese sen desperdicio de auga. Esta observación confirma que o aumento da auga aplicada non se traduce linearmente en maiores rendementos e que a eficiencia depende da forma na que a auga se distribúe entre procesos fisiolóxicos e perdas non produtivas.

Os resultados obtidos ao longo dos diferentes ensaios revelan que a viticultura da “Região dos Vinhos Verdes” afronta un dilema central: por unha banda, preservar a súa identidade tradicional de sequeiro e o perfil enolóxico que a distingue; por outra, garantir a resiliencia e a sustentabilidade económica nun contexto de crecente variabilidade climática. As evidencias obtidas con este traballo confirman que confiar só na precipitación natural xa non é suficiente para garantir estabilidade produtiva e cualitativa. A variabilidade interanual acentuada e os

episodios de seca intraestacionais comprometen a regularidade das colleitas e expoñen os viticultores a riscos significativos. Neste contexto, a rega deficitaria xorde como unha solución de compromiso, capaz de estabilizar rendementos, manter ou mesmo mellorar parámetros de calidade e, simultaneamente, optimizar a eficiencia no uso da auga.

O impacto das alteracións climáticas na viticultura atlántica non pode ser subestimado. As proxeccións máis recentes apuntan a aumentos da temperatura media, redución da precipitación anual, maior frecuencia de ondas de calor e maior irregularidade na distribución das chuvias, así como chuvias máis intensas. Estes factores combinados terán implicacións fondas na fenoloxía da vide, no balance hídrico do solo e na tipicidade dos viños producidos. No caso da Rexión dos Viños Verdes, onde a identidade descansa na frescura, na acidez e no carácter aromático, estas alteracións representan unha ameaza significativa. A adopción de prácticas de adaptación, como a rega deficitaria, a monitorización fisiolóxica e o uso de modelos de simulación, non é só recomendábel, senón necesaria para preservar a competitividade e a sustentabilidade do sector.

En síntese, a análise realizada nestes estudos permite destacar varias conclusións fundamentais. Primeiro, a viticultura de sequeiro, aínda que tradicional e identitaria, é insuficiente para garantir a estabilidade produtiva e cualitativa en escenarios de crecente variabilidade climática. Segundo, a rega total non constitúe a solución ideal, dado que pode inducir exceso de vigor e non presenta ganancias proporcionais de produtividade. Terceiro, a rega deficitaria, calibrada en función das características do solo, do clima e do cultivar, representa a estratexia máis eficiente e sustentábel, ao asegurar equilibrio entre produción, calidade e uso racional da auga. Cuarto, a integración de ferramentas de monitorización e modelización, como o SWP e o SIMDualKc, ofrece unha base sólida para a toma de decisións informadas e adaptativas. Finalmente, a adaptación da viticultura rexional esixe unha visión holística que combine prácticas agronómicas innovadoras coa preservación da identidade enolóxica que distingue os Viños.

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estabelece-se um enquadramento teórico da Região dos Vinhos Verdes no contexto vitivinícola nacional. Seguidamente apresenta-se uma caracterização de duas sub-regiões, a sub-região do Lima e a sub-região Monção e Melgaço, com ênfase particular nos cultivares Loureiro e Alvarinho, as quais são objetivo de estudo na presente tese.

Subsequentemente, procede-se à prestação da problemática das alterações climáticas na cultura da *Vitis vinifera* L., enfatizando os impactos esperáveis nesta cultura num clima atlântico. Em articulação com esta temática, será seguidamente discutida a importância do balanço hídrico do solo para o adequado desenvolvimento fisiológico da videira, destacando-se a eficiência do uso da água como estratégia de mitigação dos efeitos decorrentes das alterações climáticas.

Inclui-se ainda um subcapítulo dedicado à justificação e à coerência científica da investigação, no qual se apresenta a relevância dos tópicos anteriormente abordados na resposta à temática desta tese. Finalmente, apresenta-se a estrutura da tese, acompanhada de uma descrição sucinta da organização e da função de cada capítulo.

1.1 A REGIÃO DOS “VINHOS VERDES”

Em Portugal existem 14 regiões vitivinícolas, 12 destas regiões estão situadas em Portugal continental (Figura 1.1), sendo as mais relevantes em termos de área e produção: Vinhos Verdes, Douro, Terras do Dão, Bairrada, Tejo, Lisboa, Península de Setúbal, Alentejo e Algarve. A Região dos Vinhos Verdes assume-se como uma das maiores regiões demarcadas do país, representando cerca de 13% da superfície vitícola nacional (IVV, 2022), apenas superada pelo Douro (23%) e Alentejo (14%). Esta expressão traduz-se também numa posição de relevo na economia nacional do vinho, com as exportações a registarem uma evolução positiva, pois nos primeiros cinco meses de 2025, as vendas ao exterior atingiram 14,7 milhões de euros, correspondendo a cerca de 6,3 milhões de litros, um aumento de 8,9% face ao período homólogo (IVV, 2025). Os aspetos diferenciadores da Região dos Vinhos Verdes encontram-se essencialmente no seu enquadramento no clima atlântico classificado segundo Köppen-Geiger como Csb, com temperaturas amenas e elevada precipitação concentrada principalmente nos meses de inverno (Kottek et al., 2006; Fraga et al., 2014) e nos solos graníticos, que originam vinhos com elevada acidez, frescura, baixo teor alcoólico e aromas frutados (Marques, 1987; IVV, 2011).

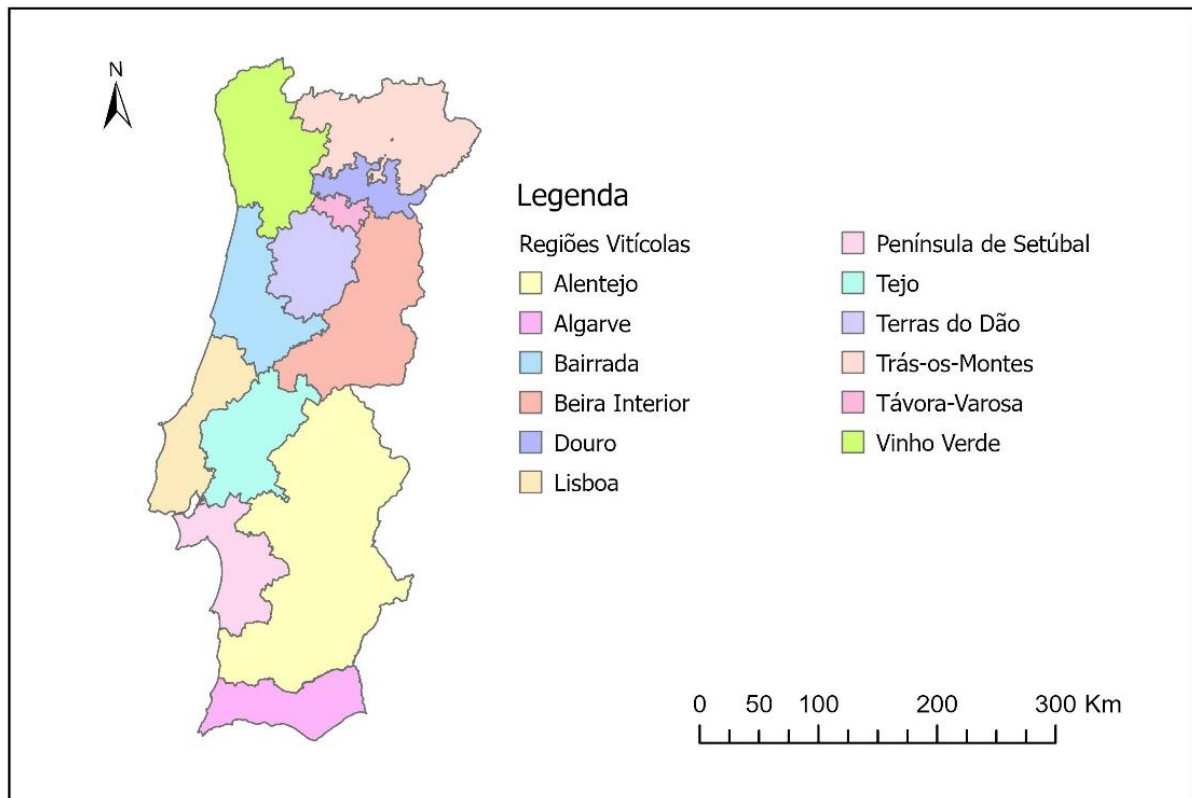


Figura 1.1 - Regiões Vitivinícolas de Portugal Continental. Fonte da shapefile: (IVV, 2023)

As origens da vitivinicultura no Minho remontam a períodos muito anteriores à criação da denominação Vinho Verde. Evidências históricas sugerem que a presença romana esteve na génese da cultura da vinha nesta região, à semelhança de outras zonas vinhateiras da Europa Ocidental (CIPVV, 2018). Durante a Idade Média, a expansão vinícola intensificou-se, em parte graças ao papel das instituições monásticas. Mosteiros e ordens religiosas (nomeadamente Beneditinos e Cistercienses) promoveram o cultivo da vinha, integrando o vinho na economia local e nas práticas sociais e litúrgicas (Cardoso, 2017).

No início do século XVI, os vinhos da região do Minho começaram a ser exportados para a Inglaterra, aproveitando as rotas marítimas a partir do Porto de Viana do Castelo. Em particular, as sub-regiões do Vale do Lima e de Monção e Melgaço destacaram-se como originárias dessas primeiras exportações de Vinho Verde para o mercado britânico (Vine to Wine Circle, 2012).

Do ponto de vista económico, a fileira do Vinho Verde foi, e continua a ser, um importante sustento para a região. A estrutura fundiária minifundiária implicou historicamente que milhares de pequenos agricultores dependessem da vinha como complemento de rendimento. Ainda hoje, a Região Demarcada dos Vinhos Verdes envolve cerca de 22 mil produtores dispersos por 48 concelhos, ocupando aproximadamente 13% da área vitícola nacional (Pellin et al., 2020; IVV, 2022).

O “Vinho Verde” é detentor de uma Denominação de Origem Protegida (DOP) registada no Registo de Indicações Geográficas da União Europeia com o número DOP-PT-A1545 (European Commission, 2022). Esta DOP abrange uma gama diversificada de tipos de vinho, incluindo vinhos brancos, tintos, rosés, espumantes e até vinagres e aguardentes de uva (CVRVV, 2024). A DOP abrange um total de 45 castas, 23 brancas e 22 tintas. Estas distribuem-se por vários distritos administrativos do norte de Portugal, dentro dos quais são reconhecidas nove sub-regiões: Amarante, Ave, Baião, Basto, Cávado, Lima, Monção e Melgaço, Paiva e Sousa. O quadro regulamentar especifica as castas que devem ser cultivadas nas diferentes sub-regiões dos Vinhos Verdes, considerando a sua capacidade de adaptação às condições climáticas e edáficas características destas (Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 1999, 2010).

Diretrizes mais recentes para esta região foram elaboradas para alinhar a regulamentação com os requisitos e metodologias dos profissionais do sector bem como para aumentar a eficiência da produção. Uma das principais mudanças foi a alteração dos valores máximos de rendimento por hectare. O valor base revisto do rendimento máximo por hectare está atualmente fixado em 10 666 kg, embora possam existir exceções (CVRVV, 2024; Official Journal of the European Union, 2024).

Tradicionalmente na Região dos Vinhos Verdes cultivam-se as videiras sem rega ou com rega muito reduzida, pois por se encontrarem nas bordaduras das parcelas eram regadas indiretamente aquando às culturas que ocupavam a maior parte das parcelas. Contudo, as alterações climáticas vão alterar o estado hídrico das videiras podendo tornar-se um fator limitante na produtividade bem como nas características enológicas de cada cultivar (Fraga et al., 2013; Santos et al., 2020). Está demonstrado em *Vitis vinifera* que o défice hídrico reduz a condutância estomática e a fotossíntese, acelera o amadurecimento (aumenta os açúcares, diminui os ácidos) e pode concentrar voláteis, embora frequentemente à custa da produtividade. Assim, a implementação de estratégias de rega, baseadas no teor de água do solo e na estimativa da evapotranspiração da cultura, têm sido descritas como práticas que contribuem para mitigar os efeitos nefastos provocados pelo stress hídrico (Junquera et al., 2012; Cancela et al., 2015; Zarrouk et al., 2016), cada dia mais presente na Região dos “Vinhos verdes” devido as alterações climáticas (Amorim, 2014).

Do ponto de vista climático e ambiental, as alterações climáticas emergem como um dos maiores desafios para o futuro da região, isto porque se a temperatura continuar a subir, a produção de Vinho Verde poderá tornar-se mais difícil, com uvas a acumularem açúcares de forma precoce e perdendo acidez (Helena and Ferreira, 2024). Nesse sentido a utilização de novas tecnologias para monitorizar o solo, a planta e o clima podem contribuir positivamente para a gestão correta da vinha de modo a manter a identidade dos “Vinhos Verdes” (Valín et al., 2021).

1.1.1 A sub-região do Lima

A sub-região do Lima, situa-se no noroeste de Portugal, ao longo do litoral Atlântico. O território apresenta um relevo variado, com zonas costeiras baixas e um interior marcadamente montanhoso e acidentado. Os solos mais férteis concentram-se nos vales estreitos do rio Lima, que atravessam a região. Administrativamente, esta sub-região estatística (NUTS III) corresponde aos dez concelhos do distrito de Viana do Castelo (Roca et al., 2001).

Nas zonas costeiras desta sub-região, as vinhas beneficiam de temperaturas moderadas, ventilação atlântica, e elevada humidade, enquanto no interior há altitudes maiores, relevo mais acidentado, e mesoclimas com amplitude térmica um pouco superior. Os solos são principalmente graníticos, com pequenas parcelas de xisto ou argila em algumas vertentes (Jones and Alves, 2012; Ribeiro and Figueiredo, 2018).

Em termos de castas, a sub-região Lima destaca-se pela casta Loureiro, com expressão aromática muito distinta (notas florais, cítricas, frescura) nestes ‘terroirs’. Também castas como Arinto e Trajadura são utilizadas, sobretudo para vinhos brancos leves e frescos. Para tintos, as variedades mais significativas em produção são o Vinhão e Borraçal, especialmente produzidos em áreas interiores onde a maturação permite cores mais profundas e taninos mais evidentes (Ribeiro and Figueiredo, 2018; IVV, 2021).

Quanto ao estilo, os vinhos da sub-região do Lima tendem a aliar frescura com elegância aromática, especialmente nos brancos, sendo frequentemente apreciados pela sua delicadeza, equilíbrio, e pela expressividade aromática ligada ao cv. Loureiro. Apresentam bons perfis térmicos que permitem vinhos menos ácidos, mantendo bom corpo (IVV, 2021; Silvia et al., 2022).

Relativamente ao cv. Loureiro de *Vitis vinifera* destaca-se uma importância ecológica e económica significativa, sendo amplamente recomendada em toda a Região Demarcada dos Vinhos Verdes (Abreu et al., 2006), bem como à sua contribuição substancial para o sector do enoturismo na região (Campos, 2012).

Os primeiros estados do desenvolvimento fenológico do cv. Loureiro observam-se entre o início e o meio da primavera, com o processo de floração a iniciar-se no final da primavera e início do verão, e o pintor a ocorrer no meio do verão. O estado de maturação é classificado como médio a tardio, o que corresponde a um período de colheita que se estende normalmente desde o final de agosto até setembro. É de salientar que as uvas Loureiro atingem a maturação completa um pouco mais tarde do que as variedades precoces do Centro-Oeste (IGEF, 1986; Oliveira et al., 2020). Do ponto de vista agronómico, o cv. Loureiro apresenta um vigor elevado e fertilidade regular, produzindo cachos grandes e compactos, de bagos médios com película fina, com produtividade de 10 a 18 mil kg ha⁻¹ sendo que a produção anual do cv. Loureiro em Portugal ronda as 26 mil toneladas (Böhm, 2010; IVV, 2022). É uma casta de ciclo médio, com abrolhamento relativamente precoce e maturação tardia, o que a torna sensível a condições de elevada humidade, muito comuns na região minhota. Como tal, revela alguma suscetibilidade ao míldio e à podridão cinzenta (*Botrytis cinerea*), exigindo práticas de viticultura de precisão para equilibrar produtividade e sanidade (Magalhães, 2015). Em termos enológicos, destaca-se por originar vinhos de elevada intensidade aromática, marcados por notas florais (loureiro, tília, flor de laranjeira) e citrinas (limão, lima), aliados a uma acidez natural viva que lhes confere frescura e persistência (Böhm, 2010; Magalhães, 2015).

1.1.2 A sub-região de Monção e Melgaço

A sub-região de Monção e Melgaço destaca-se por ter um mesoclima bastante singular dentro da Região dos Vinhos Verdes. Localizada na fronteira com a Galiza (norte de Portugal), junto ao rio Minho, a influência marítima é menor do que noutras sub-regiões costeiras, o que permite verões quentes e secos e invernos frios, com precipitação moderada ($\pm 1100 \text{ mm ano}^{-1}$). Os solos são predominantemente graníticos, com algumas faixas de cascalho, sobretudo nas vertentes mais inclinadas. Esse conjunto favorece uma maturação mais completa das uvas. Essas características tornam a sub-região uma das mais propícias à casta de elevado potencial de qualidade (Jorge, 2016; IVV, 2021; Teixeira et al., 2021).

O cultivar mais emblemático de Monção e Melgaço é o cv. Alvarinho. O Alvarinho, produzido nesta sub-região, exprime-se com elevada intensidade aromática, boa estrutura, teor alcoólico normalmente um pouco mais elevado que o habitual na Região dos Vinhos Verdes, e acidez bem integrada (Abreu, 2020; IVV, 2021).

A sub-região de Monção e Melgaço têm beneficiado de reconhecimento internacional e estudos científicos comprovam que existem diferenças entre esta sub-região e outras na produção do cv. Alvarinho. Teixeira et al. (2021) usaram uma abordagem multidisciplinar para distinguir vinhos da sub-região Monção e Melgaço de outras sub-regiões, com base em compostos voláteis, perfil sensorial e variáveis químicas. E concluíram que a sub-região de Monção e Melgaço possui atributos enológicos mensuráveis que justificam sua reputação de “premium” dentro da Região dos Vinhos Verdes.

O cv. Alvarinho desempenha também um papel fundamental na promoção do desenvolvimento local na Região dos Vinhos Verdes, em particular nesta sub-região de Monção e Melgaço. Isto deve-se principalmente à sua associação com a geração de rendimento económico privado proveniente da produção de vinho.

O início do desenvolvimento fenológico deste cultivar ocorre no princípio da primavera em condições atlânticas. A floração e o conjunto de bagos também ocorrem no verão (maio a junho), mas o cv. Alvarinho amadurece relativamente tarde. A colheita das uvas ocorre normalmente de meados a finais de setembro, subsequente à maioria das outras uvas brancas, com o objetivo de atingir níveis ótimos de açúcar, preservando a acidez característica da uva (IGEF, 1986; Reis et al., 2020).

O cultivar Alvarinho apresenta um vigor moderado a elevado, com abrolhamento precoce e maturação média a precoce com produtividades que variam entre 7500 a 12000 kg ha^{-1} (Böhm, 2010). Os cachos são pequenos e compactos, de bagos pequenos e película espessa, características que favorecem a acumulação de compostos aromáticos e fenólicos (Böhm, 2010). A casta é sensível ao míldio e particularmente ao oídio, o que exige monitorização fitossanitária frequente, mas adapta-se bem a sistemas de condução que promovam a exposição solar equilibrada e uma boa circulação de ar (Magalhães, 2015). Do ponto de vista enológico, origina mostos de elevada acidez total e bom teor alcoólico (cerca de $12\% \text{ vol.}$), que dão origem a vinhos frescos, estruturados e de grande persistência (Böhm, 2010; Magalhães, 2015; Marasà et al., 2024).

Um estudo comparativo entre o cv. Alvarinho e o cv. Loureiro mostram que o Loureiro tende a apresentar um perfil mais cítrico e floral, enquanto o Alvarinho revela carácter mais frutado e tropical (Oliveira et al., 2008).

1.2 OS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA *VITIS VINIFERA*

Os primeiros estudos que referem os efeitos das alterações climáticas na produção de *Vitis vinifera* remontam a 1996. Essa primeira análise, que utilizou cenários de transição do MCG (modelo de circulação geral), demonstrou alterações variáveis na matéria seca média dos frutos para diferentes cenários (Bindi et al., 1996). Em estudos recentes, foi relatado que as alterações climáticas estão a acelerar o amadurecimento das uvas em muitas partes do mundo. Este fenómeno já foi observado durante o século XX, quando a temperatura da superfície terrestre aumentou $0,6 \text{ °C} \pm 0,2 \text{ °C}$ (Molitor et al., 2013). Essas temperaturas mais elevadas podem causar uma desconexão entre a maturação técnica e a maturação fenólica, resultando em vinhos desequilibrados (Cabral et al., 2023). Nesse sentido diversos modelos e projetos de previsão climática foram desenvolvidos para abordar esta questão. Estes modelos visam projetar o impacto das alterações climáticas na fisiologia, produtividade e ciclo fenológico das videiras (Res et al., 2008; Jorquera-Fontena and Orrego-Verdugo, 2010; Zarrouk et al., 2016; Labbé et al., 2019; Ramos and de Toda, 2022).

Baseado nas projeções climáticas do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC), um estudo que comparou as tendências históricas com projeções de cenários desde 1990 até ao presente (2021) conclui que alguns desses cenários sobrestimaram e outros não subestimaram as emissões globais reais. No geral, as emissões globais históricas seguiram uma trajetória de emissões média-alta, como reportado nos três conjuntos de previsões mais recentes: IS92, SRES e RCP/SSP (Strandsbjerg Tristan Pedersen et al., 2021)

Com base nas projeções do IPCC alguns autores calcularam indicadores bioclimáticos para avaliar a adequação das atuais regiões vitivinícolas e demonstrar como as alterações climáticas irão afetar a distribuição geográfica das regiões com potencial vitivinícola. Os índices bioclimáticos habitualmente utilizados na produção de vinho, como o Índice de Huglin (HI), o Índice de Noites Frias (CI), indicam alterações significativas no panorama de produção atual (Gaitan and Pino-Otin 2023, Malheiro et al. 2010, Yzarra and Sanabria 2015). De acordo com os índices, os autores sugerem que os impactos negativos na viticultura serão maiores no sul de Europa, principalmente devido ao aumento da seca e de eventos térmicos extremos durante o ciclo cultural (Malheiro et al., 2010). Estes modelos indicam também um início mais precoce de todas as fases de crescimento da videira e sugerem que a área ideal para a produção de uma determinada variedade está a deslocar-se para norte da Europa (Pieri et al., 2012; Sgubin et al., 2018).

No Norte de Portugal, projeta-se que até 2100 (cenário RCP8.5), se verifique um aumento da temperatura média entre $+2,0$ e $+3,5 \text{ °C}$, com o aquecimento no ciclo cultural a ultrapassar os $+2,2 \text{ °C}$ (Fraga and Santos, 2021). Está comprovado que este aquecimento provoca um aumento de 30% na acumulação térmica em sub-regiões como Monção e Melgaço, prolongando assim os períodos de stress térmico ($>30 \text{ °C}$) em 15 a 30 dias por ano e causando impactos no desenvolvimento da *Vitis vinifera* (Fraga et al., 2017).

Com o mesmo propósito, têm sido propostos índices agroclimáticos específicos para distintas regiões do globo, os quais demonstram um progressivo deslocamento latitudinal das condições climáticas. Este fenómeno favorece particularmente áreas situadas em latitudes mais elevadas e em zonas de maior altitude, que passam a apresentar condições mais adequadas para a cultura da vinha (Solman et al., 2018; An et al., 2022; Koufos et al., 2022). Em contrapartida, as atuais regiões de produção são confrontadas com a necessidade de implementar estratégias de adaptação (Wolfe et al., 2008; Schultze and Sabbatini, 2022).

1.3 ESTIMATIVA DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DA *VITIS VINIFERA*

O setor agrícola é responsável por representa cerca de 70% do consumo de água, pelo que a eficiência no uso da água é crucial na manutenção da sustentabilidade da produção e preservação deste recurso escasso (Fischer et al., 2007; FAO & WWC, 2015). No caso da *Vitis vinifera* L., a disponibilidade de água durante o seu desenvolvimento influencia o rendimento e a qualidade das uvas, sendo o défice de água uma das principais limitações ao desenvolvimento fisiológico da planta (Pellegrino et al., 2005; Girona et al., 2009). Nesse sentido gestão eficiente da água em viticultura é e será um dos maiores desafios para os viticultores, não apenas pela elevada variabilidade climática que atualmente se verifica, mas também das projeções que apontam para a sua intensificação nas próximas décadas.

As projeções climáticas apontam para um aumento da frequência de fenómenos extremos, como as ondas de calor, bem como uma tendência para maior irregularidade nos regimes de precipitação (Iglesias and Garrote, 2015), pelo que a adoção de estratégias de rega deficitária pode não só melhorar a eficiência no uso da água como também potenciar as características qualitativas das uvas (Shellie, 2014; Phogat et al., 2017; Vilanova et al., 2019).

A estimativa das necessidades hídricas das videiras é frequentemente realizada a partir da evapotranspiração da cultura (ET_c), existindo duas abordagens principais para a sua estimativa, o coeficiente cultural (single K_c) e o coeficiente cultural dual (dual K_c) (Allen et al., 1998).

O método do coeficiente simples (single K_c) estima a evapotranspiração da cultura a partir da multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o) por um coeficiente cultural (K_c). Apesar da sua simplicidade, este método apresenta limitações, pois não distingue os componentes de transpiração da videira e de evaporação do solo, tratando-os como um único fator agregado (Allen et al., 1998). Este método tende a ser menos preciso em culturas perenes com cobertura vegetal ativa, onde a variação da densidade e altura dessa influência significativamente o balanço hídrico do solo (Allen and Pereira, 2009; Pereira et al., 2020b).

Já a abordagem dos coeficientes culturais duais (dual K_c) acrescenta rigor pois desagrega a ET_c em transpiração da planta e evaporação do solo (K_e), ajustando ainda os valores por um coeficiente de stress hídrico (K_s). Desta forma, permite melhorar o cálculo do balanço hídrico do solo, considerando a evolução da cobertura vegetal ativa (Fandiño et al., 2015). Nesse sentido a abordagem dos coeficientes culturais duais apresenta maior precisão para simular a evapotranspiração da cultura real ($ET_{c\ act}$) e ajudando a estimar as necessidades hídricas da cultura em diferentes fases do seu desenvolvimento bem como perante diversas localizações climáticas e edáficas (Pereira et al., 2020b).

Modelos de simulação do balanço hídrico do solo como o SIMDual K_c (Rosa et al., 2012a; Pereira et al., 2020a), o AquaCrop (FAO, 2012; Er-Raki et al., 2021) e o SALTMED (Ragab, 2002; El-Sadek, 2014) operacionalizam esta abordagem, realizando o balanço hídrico do solo com base em variáveis meteorológicas, edáficas e fisiológicas. Estes modelos permitem estimar, com maior detalhe, a transpiração da videira, a evaporação da cobertura vegetal ativa e a água total utilizada.

1.4 JUSTIFICAÇÃO E COERÊNCIA DA TESE

As alterações climáticas atualmente observadas, bem como as que se encontram nas projeções futuras, têm impacto nas culturas agrícolas como a *Vitis vinifera*. Vários autores indicam que, para cultivares como o Loureiro e o Alvarinho, pequenas flutuações nas condições climáticas, como a temperatura, a precipitação ou a radiação solar, podem ter um elevado impacto em todo o desenvolvimento cultural, afetando significativamente a produtividade e a qualidade dos vinhos (Fraga et al., 2016; Adão et al., 2023; Ramos, 2025). De acordo com o sistema Köppen-Geiger, o clima da Região dos Vinhos Verdes é atualmente classificado como Csb, com temperaturas amenas e elevada precipitação concentrada principalmente nos meses de inverno (Kottek et al., 2006; Fraga et al., 2014). No entanto, os cenários climáticos apontam para uma alteração da realidade com o aparecimento de fenómenos extremos (precipitação elevada ou ondas de calor extremas), aumentos de temperatura, bem como diminuição da precipitação nos meses de verão. A conjugação destes fatores ameaça e põe em risco o equilíbrio ecológico e produtivo da região (Droulia and Charalampopoulos, 2021; Fonseca et al., 2023), assim como a viabilidade económica e social dum setor de grande relevância para a região Norte de Portugal.

Os efeitos adversos destas alterações climáticas já foram identificados e levam frequentemente a impactos negativos nas culturas agrícolas. No caso da viticultura, afetam significativamente a sua fenologia, nomeadamente pela antecipação do ciclo cultural e pela redução do período de maturação (Dinu et al., 2021; Kamila et al., 2024). Assim, um desequilíbrio entre o teor de açúcar e a acidez das uvas, que na região dos Vinhos Verdes, irá alterar o perfil organolético dos vinhos tradicionalmente conhecidos pela sua frescura e teor alcoólico moderado (Baltazar et al., 2025). No mesmo sentido, a exposição a temperaturas mais elevadas durante a maturação pode levar à degradação de compostos aromáticos e fenólicos, altamente relacionados com a qualidade do vinho (Jones et al., 2005).

Neste sentido, e de acordo com inúmeros estudos e legislação, a adaptação às alterações climáticas pretende ser uma das prioridades dos tempos atuais, visto que vivemos um momento decisivo, uma vez que estas alterações implicam inúmeros riscos para vários setores sociais. Com base nesta preocupação, em 2019, a Comissão Europeia lançou o Pacto Ecológico Europeu, que contém estratégias para mitigar estas alterações (European Commission, 2019). Perante este conhecimento e sabendo que a viticultura na Região dos Vinhos Verdes assume uma importância socioeconómica e cultural significativa, torna-se importante e pertinente a realização de estudos para promover a adaptação e mitigação destas alterações climáticas, de forma a garantir a resiliência das culturas em termos de parâmetros produtivos e qualitativos, bem como promover a preservação do património vitivinícola regional (Santos et al., 2020).

Considerando estes pressupostos, o estudo da adaptação da *Vitis vinifera* às alterações climáticas na Região dos Vinhos Verdes reveste-se de particular relevância, tanto pela necessidade de promover a sustentabilidade ambiental, económica e social do setor, mas também pela manutenção da identidade e tipicidade que caracterizam os Vinhos verdes. A correta compreensão dos impactos climáticos e a definição de estratégias de mitigação e adaptação, como a correta gestão da água, assumem-se como ferramentas essenciais para garantir a continuidade da produção de Vinhos Verdes sem que estes percam a sua identidade.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A tese está dividida em sete capítulos, da seguinte forma:

Em primeiro lugar, no capítulo 1 apresenta-se um enquadramento teórico da Região dos Vinhos Verdes no contexto vitivinícola nacional, com destaque para as sub-regiões do Lima e de Monção e Melgaço, para os cultivares Loureiro e Alvarinho. Aborda-se ainda a problemática das alterações climáticas na viticultura atlântica, salientando os impactos na *Vitis vinifera* L. bem como a necessidade de delinear estratégias de mitigação desses impactos. Por fim, apresenta-se a importância e atual relevância deste estudo bem como a estrutura global da tese, com a descrição sintética da função de cada capítulo.

O capítulo 2 apresenta as hipóteses estudadas, bem como os objetivos inerentes a esta investigação. Neste capítulo são formuladas as questões centrais que guiam o trabalho, procurando identificar de que forma os cultivares Loureiro e Alvarinho respondem às condições de stress hídrico na Região dos Vinhos Verdes. As hipóteses enunciadas refletem a premissa de que a variação das condições meteorológicas e edáficas influencia significativamente os parâmetros fisiológicos, produtivos e qualitativos da videira, podendo comprometer a produtividade tipicidade destes vinhos.

O capítulo 3 expõe uma síntese metodológica, na qual são destacados os principais aspetos que permitem a comparação entre os artigos incorporados nesta tese. Esta exposição é realizada de forma articulada com os objetivos definidos no capítulo 2, assegurando a coerência entre a fundamentação teórica, as hipóteses de investigação e as abordagens metodológicas adotadas.

Seguidamente, e por ordem cronológica de publicação, são apresentados no capítulo 4 as publicações que sustentam esta tese, como se segue:

Capítulo 4.1: Artigo com título “Dual Crop Coefficient Approach in *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro”, publicado na revista *Agronomy* em 2021, citado 17 vezes. Neste artigo o objetivo foi estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c) da *Vitis vinifera* cv. Loureiro na sub-região do Lima, aplicando a abordagem dos coeficientes culturais duais (dual K_c), através da calibração e validação do modelo SIMDual K_c , de modo a disponibilizar coeficientes de cultura ajustados e apoiar uma gestão de rega mais eficiente e sustentável

Capítulo 4.2: Artigo com título “Water productivity in *Vitis vinifera* L. cv. Alvarinho using dual crop coefficient approach”. publicado na revista *Agricultural Water Management* em 2024, citado 2 vezes. Este artigo apresenta novos avanços no estudo da produtividade da água (WP) e da eficiência do uso da água (WUE) em vinhas com cobertura vegetal ativa na sub-região de Monção e Melgaço, o que aumenta a sua relevância para compreender os efeitos da gestão da rega e definir a estratégia mais adequada que permita alcançar uma produção vitivinícola sustentável nestas áreas do mundo.

Capítulo 4.3: Artigo com título “Agronomic and must quality performance of *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro: a four-year study” publicado na revista *Ciência e técnica vitivinícola* em 2025. Este artigo apresenta uma avaliação inédita e de longo prazo sobre estratégias de gestão da rega em *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro na Região dos Vinhos Verdes, tradicionalmente de sequeiro. A sua relevância reside em demonstrar que a rega, mesmo em níveis deficitários, aumenta a produtividade da videira e a eficiência do uso da água ao longo do tempo. Os resultados deste artigo fornecem contributos valiosos para a gestão sustentável da água na viticultura e apoiam estratégias de adaptação para mitigar os efeitos das alterações climáticas.

Assim, os capítulos 4.1, 4.2 e 4.3 correspondem às publicações em revistas com revisão por pares que constituem o corpo principal desta tese. No entanto, é importante realçar que estas publicações têm pontos em comum para elaborar uma resposta aos objetivos deste trabalho, referidos no capítulo 2.

No quinto capítulo (discussão), é apresentada uma discussão crítica e aprofundada dos artigos incluídos na tese, estabelecendo-se comparações entre os resultados obtidos nos artigos dos capítulos 4 com os reportados por outros autores em contextos semelhantes. Esta abordagem permite validar os resultados obtidos através da identificação de convergências e discrepâncias com a literatura existente e, ao mesmo tempo, realçar a relevância científica e deste trabalho. Neste capítulo procura-se, assim, fornecer uma visão integrada das respostas experimentais observadas, reforçando a consistência dos resultados e a sua aplicabilidade no contexto vitivinícola da Região dos Vinhos verdes.

No capítulo de conclusões (capítulo 6) resumem-se os contributos centrais decorrentes dos três artigos, articulando-os de forma a responder de modo claro e sucinto às hipóteses enunciadas no capítulo 2 e ao objetivo geral da tese. Para além disso neste capítulo evidencia-se o valor acrescentado do estudo para a gestão sustentável da viticultura em regiões de clima atlântico, tal como a Região dos Vinhos verdes, apontando perspectivas de continuidade e possíveis linhas de investigação futura. No último capítulo (capítulo 7) apresenta-se a bibliografia.

2 HIPÓTESES E OBJETIVOS

A Região dos Vinhos Verdes está exposta às pressões das alterações climáticas, associadas à alteração dos padrões de precipitação, das temperaturas do ar e ao aumento da procura evaporativa atmosférica. Neste contexto, a resiliência e a produtividade dos cultivares de *Vitis vinifera* L. estão a ser desafiadas pelo défice de água no solo e pelo stress térmico, que comprometem a estabilidade da produção e a qualidade futura dos vinhos. Apesar do clima atlântico da região, a frequência e a intensidade dos períodos de seca intra-anuais têm aumentado, impondo stress fisiológico à vinha.

Com base em evidências derivadas de ensaios de campo plurianuais e apoiadas por recentes avanços na modelação ecofisiológica e hidrológica, o presente estudo foca-se no efeito das alterações climáticas na *Vitis vinifera* L. no cv. Loureiro e no cv. Alvarinho. Neste sentido, as três hipóteses científicas seguintes são estudadas:

Hipótese 1: A viticultura tradicional de sequeiro praticada na Região dos Vinhos Verdes é insuficiente para manter a estabilidade da produção e da qualidade do mosto sob constante variabilidade climática.

Hipótese 2: A implementação de estratégias de rega deficitária, calibradas para as características do cultivar, do clima e do solo, melhora tanto o desempenho agronómico como a eficiência do uso da água da *Vitis vinifera*, sem comprometer a qualidade da uva.

Hipótese 3: A monitorização de parâmetros fisiológicos das plantas, nomeadamente o stress hídrico e a transpiração, bem como a simulação do balanço hídrico do solo através da metodologia dos coeficientes culturais duais em cada fase do ciclo cultural dos cv. Loureiro e cv. Alvarinho, permite definir as melhores práticas vitícolas sustentáveis, em especial a rega, de forma a fazer face às alterações climáticas.

Objetivo geral: O principal objetivo desta tese foi desenvolver, implementar e validar uma metodologia que permite avaliar e melhorar a capacidade de adaptação da *Vitis vinifera* às alterações climáticas na Região dos Vinhos Verdes, em particular dos cultivares Loureiro e Alvarinho. Esta abordagem integrou a experimentação em campo, a monitorização fisiológica e a aplicação da metodologia dos coeficientes de cultura duais, visando a produção de conhecimento que suporte o desenvolvimento de estratégias para a adaptação da *Vitis vinifera* às alterações climáticas e para a promoção da eficiência no uso da água.

Para atingir o objetivo geral e testar as hipóteses propostas, a investigação está estruturada em cinco objetivos específicos (OE) relacionados e desenvolvidos em três artigos. Cada objetivo corresponde a uma componente central da estrutura metodológica e é abordado através da recolha, modelação e análise de dados direcionados, como se segue:

OE1. Caracterização Climática e Fenológica - Capítulos 4.1, 4.2 e 4.3

Caracterizar a evolução climática histórica e recente na Região dos Vinhos Verdes através de índices bioclimáticos padronizados, como o Índice de Winkler (WI), o Índice de Huglin (HI), o Índice de Branas (BI) e o Índice de Noites Frias (CI), e avaliar a sua influência no desenvolvimento fenológico da *Vitis vinifera* ao longo de múltiplas colheitas. Este objetivo elucidará a variabilidade espaço-temporal das pressões climáticas e as suas implicações fenológicas, servindo de base para o planeamento da adaptação a novos cenários climáticos.

OE2. Determinar os coeficientes culturais basais da *Vitis vinifera* cv. Loureiro e cv Alvarinho - Capítulos 4.1 e 4.2

Um objetivo deste estudo é determinar o coeficiente cultural basal (K_{cb}) para os cultivares de *Vitis vinifera* Loureiro e Alvarinho nas varias fases do seu ciclo cultural, aplicando o modelo SIMDualKc calibrado e posteriormente validado com dados do teor de água no solo reais. Neste sentido, o objetivo é obter valores precisos de K_{cb} específicos para cada cultivar em diferentes estados fenológicos.

OE3. Avaliação de Estratégias de Rega - Capítulos 4.2 e 4.3

Realizar uma avaliação comparativa plurianual, em campo, de três estratégias de gestão da rega, sequeiro (R), rega deficitária (DI) e rega total (FI ou I), em vinhas comerciais de *Vitis vinifera* cv. Loureiro e cv. Alvarinho. A avaliação incidirá sobre o desempenho da produtividade e qualidade do mosto, sob condições sazonais variáveis. O objetivo é identificar a estratégia de rega que melhor equilibra a produtividade, a qualidade e o uso da água no contexto vitivinícola do Atlântico.

OE4. Quantificação das Respostas Fisiológicas ao Stress Hídrico - Capítulos 4.2 e 4.3

Monitorizar e analisar as respostas fisiológicas da videira à disponibilidade hídrica utilizando o potencial hídrico de ramo, a evapotranspiração cultural e a transpiração (T), determinados pela abordagem dos coeficientes culturais duais (SIMDualKc). Estes indicadores estarão relacionados com resultados agronómicos e qualitativos, permitindo uma compreensão de como o stress hídrico afeta a função da videira e o desenvolvimento do fruto a nível fisiológico.

OE5. Análise da Produtividade e Eficiência do Uso da Água - Capítulos 4.2 e 4.3

Calcular e comparar os principais índices de produtividade da água relacionado a produtividade das videiras com o consumo de água, entre tratamentos e ciclos culturais. Esta análise avaliou a eficiência da utilização da água e identificou as estratégias de rega mais eficazes, apoiando assim a intensificação sustentável da viticultura em condições de crescentes desafios climáticos.

3 FERRAMENTAS METODOLÓGICAS

Este capítulo sintetiza os procedimentos experimentais, a instrumentação, os protocolos de modelação e as análises estatísticas utilizados em três estudos tematicamente alinhados e desenvolvidos com os cultivares Loureiro e Alvarinho de *Vitis vinifera* L., realizados na sub-região dos Vinhos Verdes no noroeste de Portugal (Figura 3.1.) O objetivo geral dos estudos aqui apresentados é fornecer ferramentas e conhecimentos cientificamente fundamentados para orientar a adaptação dos sistemas vitícolas às alterações climáticas na Região dos Vinhos Verdes, uma zona vitícola caracterizada pelo aumento da variabilidade climática, padrões de precipitação alterados e aumento da procura de evapotranspiração. A investigação centrou-se na avaliação da influência das estratégias de rega no balanço hídrico do solo das vinhas, no desempenho produtivo e nas métricas de utilização da água, utilizando a metodologia dos coeficientes culturais duais incorporada no modelo SIMDualKc. Os cultivares estudados foram o Alvarinho e o Loureiro, que são regionalmente importantes devido à sua relevância enológica e agronómica.

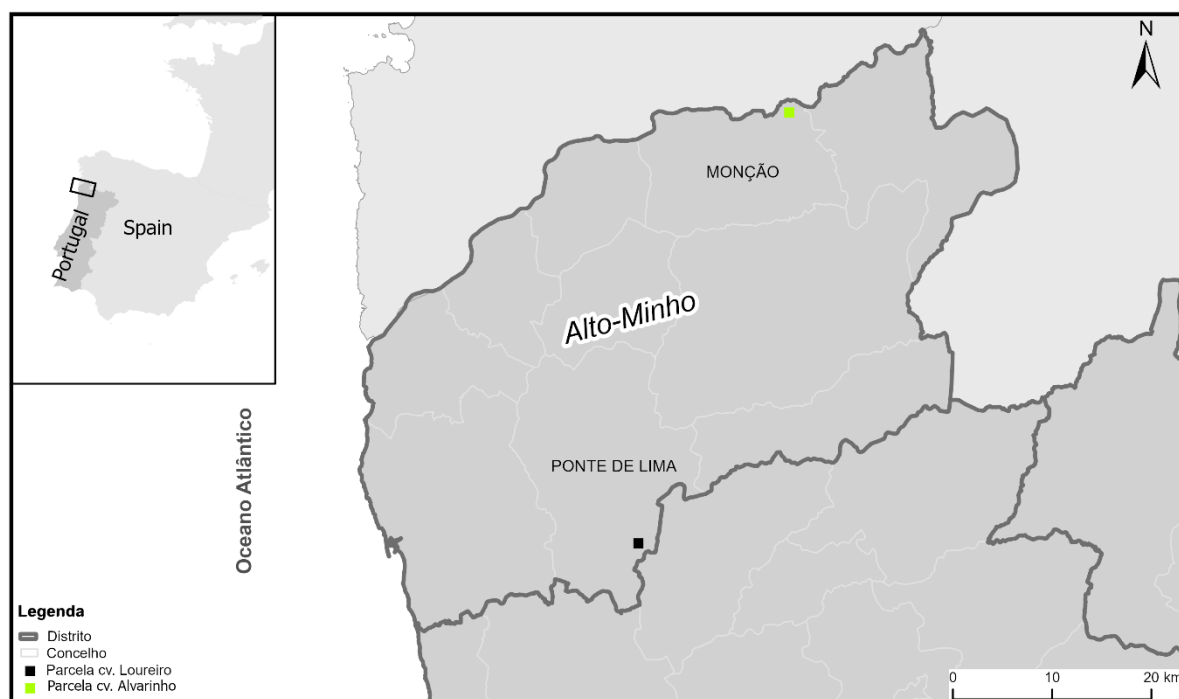


Figura 3.1 - Localização das parcelas dos estudos (Fonte: Elaboração Própria)

Os estudos utilizaram um delineamento em blocos causalizados com três estratégias de rega: sequeiro (R), rega deficitária (DI) e rega total (FI ou I). Nos tratamentos de rega deficitária aplicaram-se entre 25 a 50% dos volumes de rega utilizados nas parcelas de rega total, dependendo dos limiares de humidade do solo. Cada unidade experimental foi constituída por quatro linhas contíguas de vinhas, sendo as duas linhas centrais utilizadas para a recolha de dados e as duas exteriores funcionaram como áreas de proteção para impedir o movimento lateral da água.

As variáveis meteorológicas foram medidas no local através de estações meteorológicas automatizadas, que registaram diariamente a temperatura do ar (máxima, mínima e média), a humidade relativa, a velocidade do vento a 2 m, a radiação solar e a precipitação. A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada através da equação de Penman-Monteith da FAO num intervalo de tempo diário (Allen et al., 1998), tendo sido aplicadas verificações de integridade climática de acordo com Allen (1996) para corrigir anomalias e preencher lacunas de dados.

O desenvolvimento fenológico da cultura foi monitorizado semanalmente e classificado de acordo com a escala de Baggiolini (Baggiolini et al., 1993), posteriormente traduzida para os estados de crescimento padrão da FAO para parametrizar a variabilidade temporal nos coeficientes da cultura. A altura do dossel (h) e a fração de cobertura vegetal ativa (fc) foram estimadas visualmente ao meio-dia solar e utilizadas para o cálculo dos coeficientes basais da cultura.

O teor de água no solo foi monitorizado nas duas parcelas com uma sonda capacitiva (Diviner 2000, Sentek), com 24 tubos de acesso instalados nos tratamentos (oito por tratamento), atingindo uma profundidade de 0,80 m.

Foram recolhidas amostras de solo e submetidas a análise em placa de pressão a -33 kPa (capacidade de campo) e -1500 kPa (coeficiente de emurchecimento). Estes valores foram utilizados para calcular a água disponível total na zona radicular (TAW) e a água facilmente utilizável (RAW), que foram parâmetros de entrada no modelo SIMDualKc.

O modelo SIMDualKc foi implementado para simular o balanço hídrico do solo utilizando a abordagem dos coeficientes culturais duais. Este modelo particiona a ET_c em transpiração basal da cultura e evaporação do solo, incorporando dados meteorológicos diários, parâmetros do solo e da cultura, dotações de rega e a evolução da cobertura vegetal ativa.

A calibração do modelo foi realizada para o tratamento de sequeiro no primeiro ano de cada estudo para evitar a influência da rega como fator de viés. Os parâmetros chave ($K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$, $K_{cb\ end}$, p , Fr , ML , TEW , REW) foram otimizados iterativamente para minimizar os resíduos entre o teor de água no solo observado e simulado. A qualidade do ajuste foi avaliada através de múltiplos indicadores estatísticos tais como o coeficiente de determinação (r^2), inclinação da reta de regressão (b), erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (AAE), RMSE normalizado (%), eficiência do modelo (EF), viés percentual (PBIAS) e índice de concordância (dIA).

Nos estudos dos cultivares Alvarinho e Loureiro, a cobertura vegetal ativa (constituída maioritariamente por *Poaceae* spp.) foi caracterizada ao longo da cultura em termos de densidade e altura (tanto na linha como entrelinha), com recurso à análise de imagens e à estimativa visual. Estes valores informaram a derivação do $K_{cb\ cover}$, que foi incorporado no coeficiente basal de cultura real total.

No estudo de quatro anos em Loureiro, o stress hídrico fisiológico foi avaliado através do potencial hídrico do ramo (SWP) medido ao meio-dia solar com uma câmara de pressão Scholander (modelo 670, PMS Instrument Co., EUA) em oito repetições por tratamento. Estes dados foram utilizados para validar o coeficiente de stress hídrico (K_s) simulado pelo modelo e para corroborar o estado hídrico das videiras sob cada estratégia de rega.

Os componentes da produtividade foram determinados na colheita, pesando todos os cachos de 28 videiras por tratamento. No ensaio Alvarinho, a biomassa da poda foi também recolhida e pesada durante o inverno para quantificar a produção vegetativa. Os parâmetros de qualidade dos frutos, como o teor alcoólico provável (a partir de °Brix), o pH, a acidez titulável ($g\ L^{-1}$) e o peso fresco de 100 frutos, foram determinados em laboratório, utilizando protocolos padrão da OIV.

Os indicadores de produtividade da água foram calculados de acordo com as equações 1, 2 e 3.

$$WP_{TWU} = \frac{GY}{TWU} \quad (\text{Equação. 1})$$

$$WP_T = \frac{GY}{T} \quad (\text{Equação 2})$$

$$WP_{ET} = \frac{GY}{ET_{c\ act}} \quad (\text{Equação 3})$$

em que TWU corresponde à água utilizada (que inclui precipitação, armazenamento de água no solo, ascensão capilar e rega aplicada), para atingir o rendimento da uva (GY, Kg ha⁻¹), T refere-se à transpiração (cultura mais cobertura vegetal ativa, m³ ha⁻¹) e ET_{c act} é a evapotranspiração real da cultura (m³ ha⁻¹).

Todos os conjuntos de dados foram submetidos a ANOVA unidirecional, e as médias dos tratamentos foram comparadas através do teste de múltiplos intervalos de Duncan com um limiar de significância de $p < 0,05$. Os índices climáticos (Winkler, Huglin, Branas, Seljaninov e Índice de Noites Frias) foram também calculados para caracterizar a variabilidade climática entre ciclos culturais e a sua influência no uso da água e na fenologia.

Para complementar a exposição metodológica, o Quadro 3.1 contrasta sistematicamente as componentes principais dos desenhos experimentais, dos protocolos de monitorização, das estratégias de modelação e dos escopos analíticos empregues nos três estudos (Quadro 3.1). Esta síntese da Quadro 3.1 visa realçar o grau de convergência e divergência metodológica entre as experiências e contextualizar os seus contributos individuais para desenvolver práticas vitícolas adaptativas ao clima na Região dos Vinhos Verdes. Para ajudar na compreensão da metodologia adotada nestes estudos, foi desenvolvido um workflow esquemático que sintetiza de forma visual as principais etapas do trabalho (Figura 3.2). Esta ferramenta permite organizar e relacionar os diferentes componentes envolvidos, desde a caracterização do solo e a monitorização climática até à implementação das estratégias de rega e avaliação das respostas fisiológicas e produtivas dos dois cultivares de *Vitis vinifera* L..

Quadro 3.1 - Comparação de Metodologias entre Estudos

| Critério | Capítulo 4.1 | Capítulo 4.2 | Capítulo 4.3 |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Cultivar | Loureiro | Alvarinho | Loureiro |
| Duração experimental | 2 anos (2019 e 2020) | 2 anos (2018 e 2019) | 4 anos (2019 a 2022) |
| Estratégias de rega | R, DI (25%), FI | R, DI (50%), FI | R, DI (25–40%), I |
| Modelo utilizado | SIMDualKc (calibrado) | SIMDualKc (calibrado) | SIMDualKc (parâmetros importados) |
| Ano base de calibração do modelo | Sequeiro 2019 | Sequeiro 2018 | Parâmetros adotados (Capítulo 4.1) |
| Cobertura vegetal ativa | Sim | Sim | Sim |
| SWP | Não | Não publicados no artigo | Sim (2019–2021, ao meio-dia) |
| Parâmetros produtivos | Rendimento | Rendimento + lenha de poda | Rendimento |
| Análise da qualidade das uvas | Não | Não | Sim |
| Índices de produtividade da água | Não | Sim | Sim |
| Validação estatística do modelo | Sim (r^2 , RMSE, EF, dIA) | Sim (r^2 , RMSE, EF, dIA) | Não |
| Índices bioclimáticos calculados | Winkler, Huglin, CI, SI, BI | Winkler, Huglin | Winkler, Huglin, CI, SI, BI |
| Estádios fenológicos | Baggiolini + FAO 56 | Baggiolini + FAO 56 | Baggiolini + FAO 56 |
| Software estatístico | SPSS 27 | SPSS 27 | SPSS 27 |

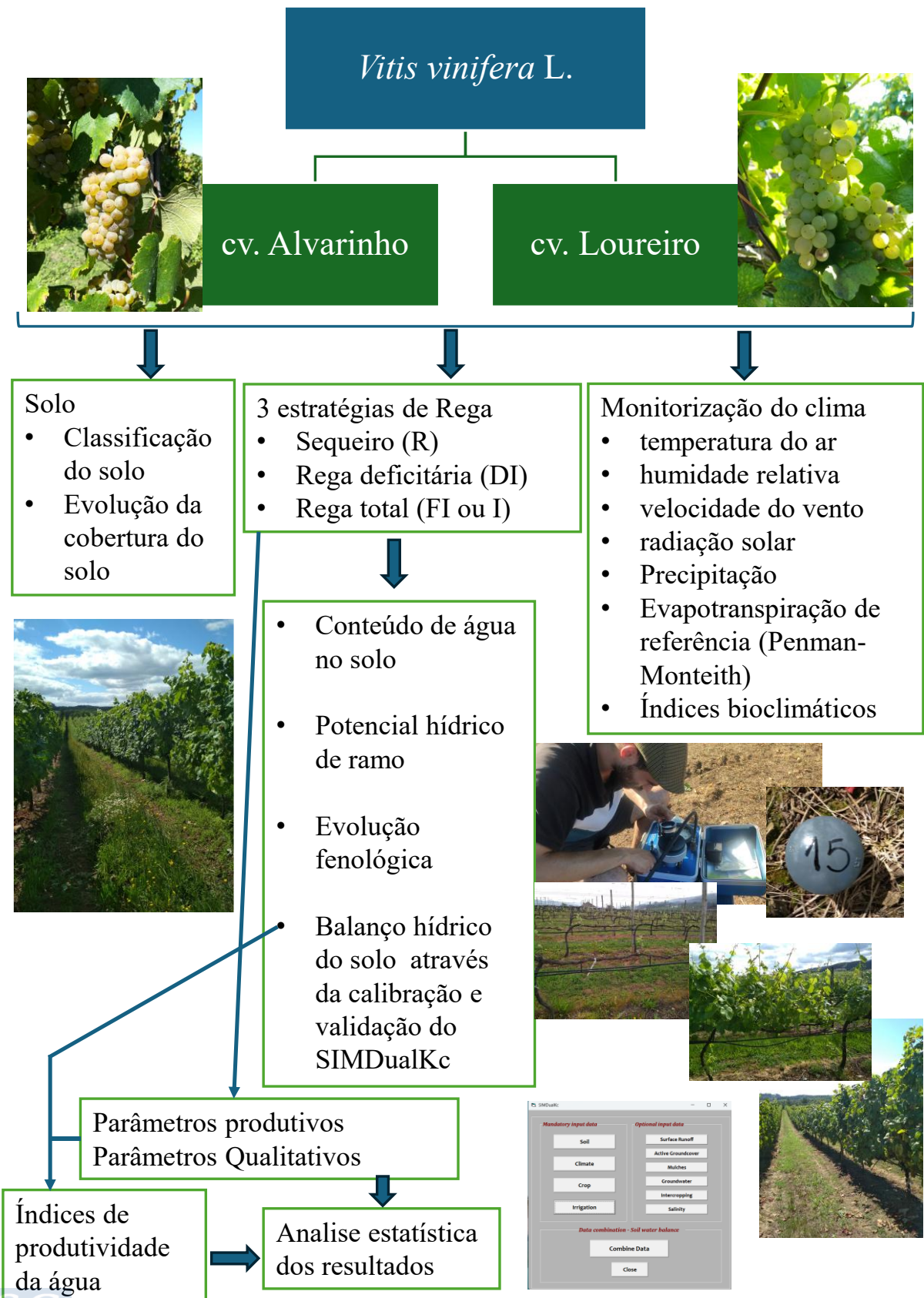


Figura 3.2 - Workflow metodológico para o estudo dos efeitos da rega nos cultivares Alvarinho e Loureiro da *Vitis vinifera L.* (Fonte: Elaboração Própria)

4 PUBLICAÇÕES

4.1 DUAL CROP COEFFICIENT APPROACH IN *VITIS VINIFERA* L. CV. LOUREIRO

Este capítulo corresponde ao seguinte artigo de investigação:

- **Título:** Dual Crop Coefficient Approach in *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro
- **Revista:** Agronomy 2021, 11(10), 2062
- **Editora:** MDPI
- **ISSN:** 2073-4395
- **DOI:** <https://doi.org/10.3390/agronomy11102062>
- **Autores:** Simão P. Silva ^{1,3}, M. Isabel Valín ¹, Susana Mendes ¹, Cláudio Araujo-Paredes ² and Javier J. Cancela ³
- **Afilições:**
 - ¹Centre for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal
 - ²Research Unit in Materials, Energy and Environment for Sustainability (PROMETHEUS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal;
 - ³GI-1716 Projects and Planification, Agroforestry Engineering Department, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Lugo, University of Santiago de Compostela, 27002 Lugo, Spain
- **Contribuição dos autores:**
 - Simão P. Silva:** Metodologia, software, validação, análise formal, investigação, tratamento de dados, redação — preparação do rascunho original
 - M. Isabel Valín:** Conceptualização, validação, análise formal, investigação, tratamento de dados, redação - revisão e edição
 - Susana Mendes:** Validação
 - Cláudio Araujo-Paredes:** Tratamento de dados
 - Javier J. Cancela:** Conceptualização, metodologia, software, escrita — revisão e edição
- **Indicadores (2021):** Fator de impacto, IF: 3.949; Primeiro quartil (Q1; 16/88) da categoria (Agronomy). Citações: 17.
- **Autorização da editora:** Este artigo é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite a sua utilização, distribuição e reprodução sem restrições em qualquer meio ou formato, para qualquer fim, sem necessidade de autorização específica. Da mesma forma, de acordo com as políticas de direitos de autor da MDPI (<https://www.mdpi.com/about/openaccess>), a editora do artigo, os autores têm o direito de utilizar e partilhar os seus trabalhos para fins académicos, incluindo em teses.

Article

Dual Crop Coefficient Approach in *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro

Simão P. Silva ^{1,*}, M. Isabel Valín ¹, Susana Mendes ¹, Cláudio Araujo-Paredes ² and Javier J. Cancela ³

- ¹ Centre for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal; isabelvalin@esa.ipv.c.pt (M.I.V.); smendes@esa.ipv.c.pt (S.M.)
- ² Research Unit in Materials, Energy and Environment for Sustainability (PROMETHEUS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal; cparedes@esa.ipv.c.pt
- ³ GI-1716 Projects and Planification, Agroforestry Engineering Department, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Lugo, University of Santiago de Compostela, 27002 Lugo, Spain; javierjose.cancela@usc.es
- * Correspondence: silvasimao@esa.ipv.c.pt

Abstract: Vineyard irrigation management in temperate zones requires knowledge of the crop water requirements, especially in the context of climate change. The main objective of this work was to estimate the crop evapotranspiration (ET_c) of *Vitis vinifera* cv. Loureiro for local conditions, applying the dual crop coefficient approach. The study was carried out in a vineyard during two growing seasons (2019–2020). Three irrigation treatments, full irrigation (FI), deficit irrigation (DI), and rainfed (R), were considered. The ET_c was estimated using the SIMDualKc model, which performs the soil water balance with the dual Kc approach. This balance was performed by calculating the basal coefficients for the grapevine ($K_{cb\ crop}$) and the active soil ground cover ($K_{cb\ gcover}$), which represent the transpiration component of ET_c and the soil evaporation coefficient (K_e). The model was calibrated and validated by comparing the simulated soil water content (SWC) with the soil water content data measured with frequency domain reflectometry (FDR). A suitable adjustment between the simulated and observed SWC was obtained for the 2019 R strategy when the model was calibrated. As for the vine crop, the best fit was obtained for $K_{cb\ full\ ini} = 0.33$, $K_{cb\ full\ mid} = 0.684$, and $K_{cb\ full\ end} = 0.54$. In this sense, the irrigation schedule must adjust these coefficients to local conditions to achieve economically and environmentally sustainable production.

Keywords: active soil ground cover; soil water content; soil evaporation; vine plants



Citation: Silva, S.P.; Valín, M.I.; Mendes, S.; Araujo-Paredes, C.; Cancela, J.J. Dual Crop Coefficient Approach in *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro. *Agronomy* **2021**, *11*, 2062. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102062>

Academic Editors: Fátima Baptista, Luis Leopoldo Silva, José Carlos Barbosa, Vasco Fitas da Cruz, Adélia Sousa, José Rafael Silva and Patrícia Lourenço

Received: 18 September 2021

Accepted: 12 October 2021

Published: 14 October 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The sustainability of wine production is a global strategy that includes all stages of the wine production cycle. In achieving sustainable wine production, the environmental aspects, such as efficient water use, should be considered [1]. Water is a factor that significantly influences crop yields [2], and it must be applied sustainably and efficiently [3]. This application must be efficient because, according to predictions, global water extraction will increase by 55% between 2000 and 2050 in a similar scenario to the current one [4]. In addition, predictions estimate a 20% decrease in precipitation in the *Vinhos Verdes* region, according to the IPCC RCP8.5 scenario [5].

To implement a sustainable strategy, it is necessary to expand the knowledge on crop evapotranspiration to support appropriate irrigation scheduling and management [5]. The estimation of crop evapotranspiration can be obtained with the single or dual crop coefficient approach (dual Kc) [6] through various field measurements techniques, for example, remote sensor data [7,8], eddy covariance [9], lysimeter [10,11], and measurements of soil water content [12,13].

The dual Kc approach estimates the actual crop evapotranspiration ($ET_{c\ act}$) through reference evapotranspiration (ET_o) and actual crop coefficient ($K_{c\ act}$). Adopting this dual Kc approach (Equation (1)), the $K_{c\ act}$ results from the sum of the basal crop coefficients

(K_{cb}), correcting through a stress coefficient (K_s) that varies between 0 (maximum stress) and 1 (no stress), with the soil evaporation (K_e) [6]. Thus, $ET_{c\ act}$ is defined as follows:

$$ET_{c\ act} = (K_s \times K_{cb} + K_e) \times ET_o = K_{c\ act} \times ET_o \quad (1)$$

where K_s represents the stress coefficient, K_{cb} is the basal crop coefficient, K_e is the soil evaporation coefficient, and ET_o represents the reference evapotranspiration (mm d^{-1}).

During the active growing season, variations in the density and height of active soil ground cover are observed in the vineyards of this region. These variations are influenced by cultural operations aimed at controlling the active soil ground cover's vegetative vigor (herbicide application or tillage operations), as well as by climatic factors [14]. The water consumption of the active soil ground cover is environmentally acceptable when considering the numerous ecosystem services provided by cover crops in vineyards [15], such as the prevention of erosion [16], the contribution to carbon (C) sequestration, the increase in total nitrogen (N) content [17], and the contributions to plant vigor and fruit quality control [18], as well as pest control [19]. However, water consumption must also be considered in crop evapotranspiration [9]. In this sense, following the dual Kc approach, the active soil ground cover represents a part of the evapotranspiration. Therefore, the total evapotranspiration results from the sum of the transpiration from active soil ground cover and vineyard with the soil evaporation [20].

The dual Kc approach for computing and partitioning crop evapotranspiration can be facilitated using index and models applications, such as the Satellite-based NDVI [21], AquaCrop model [22], and SIMDualKc model [23,24]. The SIMDualKc performs the soil water balance at the field level, using a daily timestep, based on Equation (2):

$$D_i = D_{i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (2)$$

where D_{i-1} is the depletion at the preceding day, P is the precipitation, I is the irrigation, CR is the capillary rise from a shallow water table, DP is the deep percolation out of the root zone, $ET_{c,i}$ is the crop evapotranspiration (mm), and RO is the runoff, with all terms expressed in mm.

This model was validated using data from several permanent crops with active soil ground cover, namely olives [8,9] and hop [25]. The model was also validated for the culture of *Vitis vinifera*, where studies on cv. Albariño [20] and Godello e Mencía [26], took into account the effect of active ground cover. In these studies, the SIMDualKc model has been shown to be appropriate for adopting the dual Kc approach. In addition, to help computing and partitioning crop evapotranspiration, SIMDualKc has been used to update dual crop coefficients for many crops [27–31].

The present study aims to provide information on evapotranspiration and crop coefficients for *Vitis vinifera* cv. Loureiro in northwest Portugal. The specific objectives of this paper are: (a) to calibrate and validate the SIMDualKc model using the dual Kc approach, (b) to provide the K_{cb} for each growth stage of the crop, (c) to apply the dual Kc approach to different irrigation strategies and (d) to verify if cv. Loureiro cultivated without irrigation (the most practiced in the region) is cultivated under drought stress. The results obtained in this work aim to support irrigation management programs, improving the use of water in agriculture.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The study was carried out in a commercial cv. Loureiro vineyard, located in Ponte de Lima, in northwest Portugal ($41^\circ 40' 32'' \text{N}$, $8^\circ 32' 6'' \text{W}$, and 170 m.a.s.l.) during two growing seasons (2019 and 2020). The vineyard was planted in 2001, with a distance between rows of 3.0 m and a distance of 2.0 m between vines ($1666 \text{ plant ha}^{-1}$). The vineyard is north–south orientated and trained to a single upward cordon. Drip irrigation was installed as the irrigation system, with one drip line per row, located at 40 cm above the

ground and pressure-compensated emitters (4 L h⁻¹) separated by one meter. The climate is Atlantic, characterized by relatively high annual rainfall (above 1200 mm) and relatively mild summers [32]. The Köppen–Geiger [33] classification is Csb.

The daily meteorological data (temperature, humidity, wind speed at 2 m height, net radiation, and precipitation) were collected from the weather station (UNL Ameriflux Site, Mead NE) located in the field. The ET_o was computed with the FAO Penman–Monteith Equation (3) [6], which, for the computation of daily timesteps, takes the following form:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 - 0.34U_2)} \quad (3)$$

where Δ represents the slope of the saturation vapor pressure–temperature relationship at the mean air temperature (kPa °C⁻¹), R_n is the net radiation at the crop surface (MJ m⁻² d⁻¹), G is the soil heat flux density (MJ m⁻² d⁻¹), γ is the psychrometric constant (kPa °C⁻¹), T is the mean daily air temperature (°C), U_2 is the wind speed (m s⁻¹) at 2 m height and $(e_a - e_d)$ represents the vapor pressure at the reference height of 2 m and deficit of air (kPa) at 2 m height.

The total rainfall was 1431 and 1590 mm in 2019 and 2020, respectively. In the growing season, the rainfall was 402 mm and 321 mm for 2019 and 2020, respectively (Figure 1). The ET_o was higher in the summer, reaching 116 mm month⁻¹ in May 2019 and 126 mm month⁻¹ in July 2020 (Figure 1). However, its daily variability was high depending on the net radiation, temperature, and wind speed.

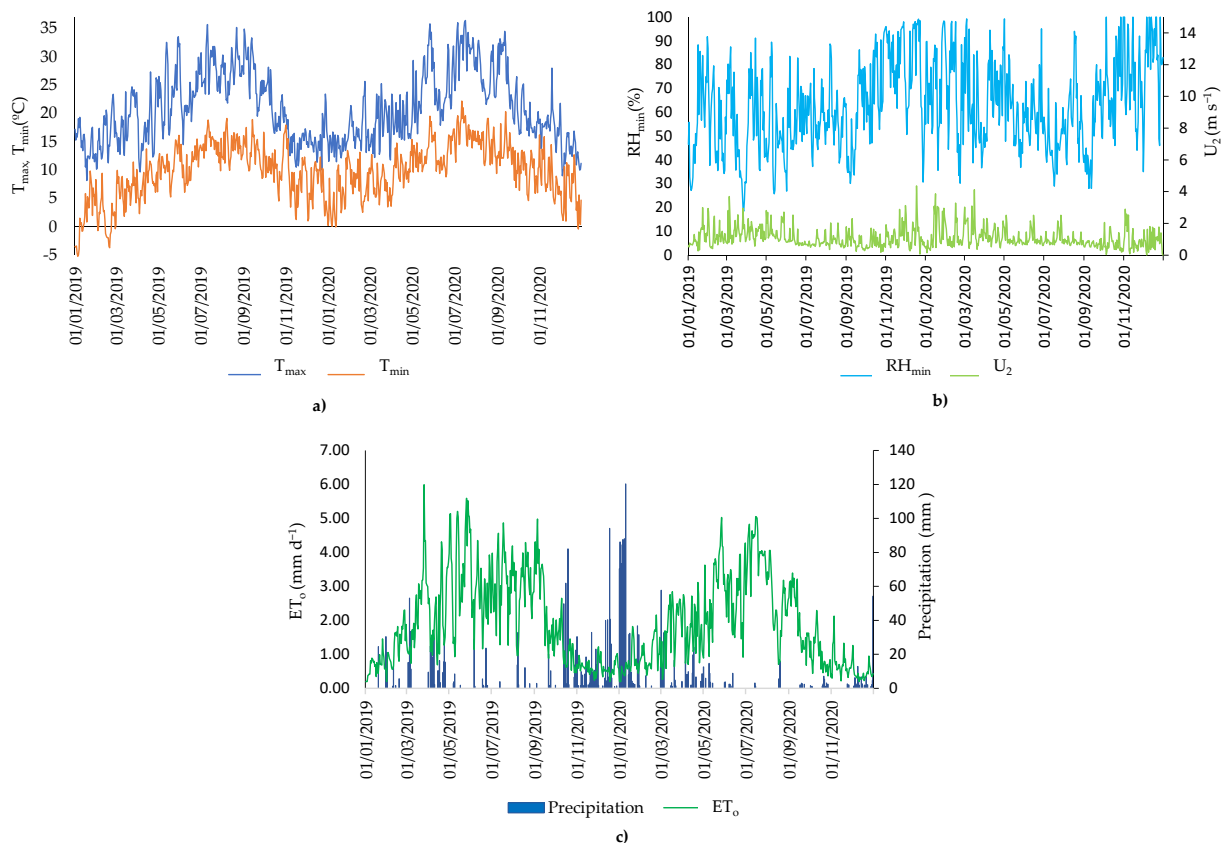


Figure 1. Daily weather data recorded in the field relative to (a) maximum (T_{max} , °C) and minimum (T_{min} , °C) temperatures; (b) minimum relative humidity (RH_{min} , %) and wind speed at 2 m height (U_2 , m s⁻¹) and (c) precipitation and reference evapotranspiration (ET_o , mm d⁻¹) for the period 2019–2020.

2.2. Climate and Soil Characterization

The climate directly and indirectly affects crop production and bioclimatic indices can be used to characterize the climate. Therefore, in this work, we used the Winkler index (WI), Huglin index (HI), Cool night index (CI), Seljaninov index (SI), and Branas index (BI), which have already been used by other authors in this region [34]. According to the climatic characterization shown in Figure 1, the growing seasons were very different with respect to the temperatures and precipitation values observed. The results of applying Equations (4) and (5) in 2019 are lower than the results for 2020 (Table 1). Thus, it is possible to verify that, in general, lower temperatures were observed in 2019. However, according to Equation (6), the minimum temperature in September 2019 was higher than the minimum temperature recorded in the same period in 2020 (Table 1). As the precipitation values were very different (Figure 1), the results of the application indexes that relate temperatures with precipitation Equations (7) and (8) were also very different in the two years of the study. Therefore, the results of Equations (7) and (8) obtained for 2019 were different from those obtained for 2020 (Table 1).

Table 1. List of the bioclimatic indices used for this study for both years, their corresponding mathematical definitions, and sources.

| Index and Abbreviation | Equation | Source | Results | | |
|------------------------|---|--------|---------|--------|--------|
| | | | 2019 | 2020 | |
| Winkler index (WI) | $\sum_{01.04}^{30.10} (T_{avg} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C})$ | (4) | [35] | 1771 | 2124 |
| Huglin index (HI) | $\sum_{01.04}^{30.09} \frac{(T_{avg}-10)+(T_{max}-10)}{2} \times k$ | (5) | [36] | 2847 | 2937 |
| Cool night index (CI) | $T_{min\text{average}}$ (september) | (6) | [37] | 13.22 | 13.05 |
| Seljaninov index (SI) | $\sum (P / (\sum ((T_{avg} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}))))$ | (7) | [38] | 0.27 | 0.29 |
| Branas index (BI) | $\sum_{01.04}^{31.08} T_{avg} \times P_{month}$ | (8) | [39] | 18,654 | 11,677 |

T_{max} is maximum air temperature ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} is minimum air temperature ($^{\circ}\text{C}$), T_{avg} is mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$), k is the length of day coefficient, and P is precipitation (mm).

The soil was classified as eutric regosol [40], with a sandy loam texture. On average, the soil contained 70.2% sand, 20.3% silt, and 9.5% clay, with 1.95% organic matter. The total available soil water (TAW) at a depth of 0.8 m (m) was 100 mm. The TAW was calculated from the difference between the soil field capacity and the permanent wilting point using eight soil layers.

The field capacity and wilting point were obtained in the laboratory. To determine the field capacity, a pressure plate was used to apply a suction of $-1/3$ of the atmosphere to the saturated soil samples. With the same samples, a suction of -15 atmospheres was applied to determine the wilting point [41]. The field capacity and wilting point values were 0.251 and $0.121 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectively. Capacitive probes were used to determine the field capacity value in situ in eight different soil layers up to 0.8 m, which ranged between 0.197 and $0.273 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for the depths of 0.1 m and 0.8 m, respectively. These values were used in the SWC simulation.

2.3. Experimental Design: Data Required to Apply SIMDualKc

Three irrigation treatments were considered, full irrigation (defined by the vinegrower; FI), deficit irrigation (DI), and rainfed (R), which is most practiced in the region. Each treatment had two replicates (Figure 2a) with four rows; in the two central rows were installed access probes and the other two rows were used as buffers (Figure 2a). To obtain the SWC readings, 24 access probe tubes (80 cm depth) were installed in the rows (Figure 2b), distributed over the treatments (8 access probe tubes per treatment). In 2019, irrigation was implemented between DOY 142 and DOY 238 to FI treatment when the volumetric soil moisture content was 90% of field capacity and reached 69.67 mm (10 irrigation events),

while for the treatment DI was implemented between DOY 204 and DOY 217 when the volumetric soil moisture content was 70% of field capacity and reached 17.33 mm (two irrigation events). In 2020, the irrigation was implemented between DOY 181 and DOY 224, when the volumetric soil moisture content was 70% of field capacity and reached 94 mm (10 irrigation events) in FI, whereas the DI reached 32 mm (6 irrigation events), FI in 2020 started later than in 2019 due to problems in the irrigation system.

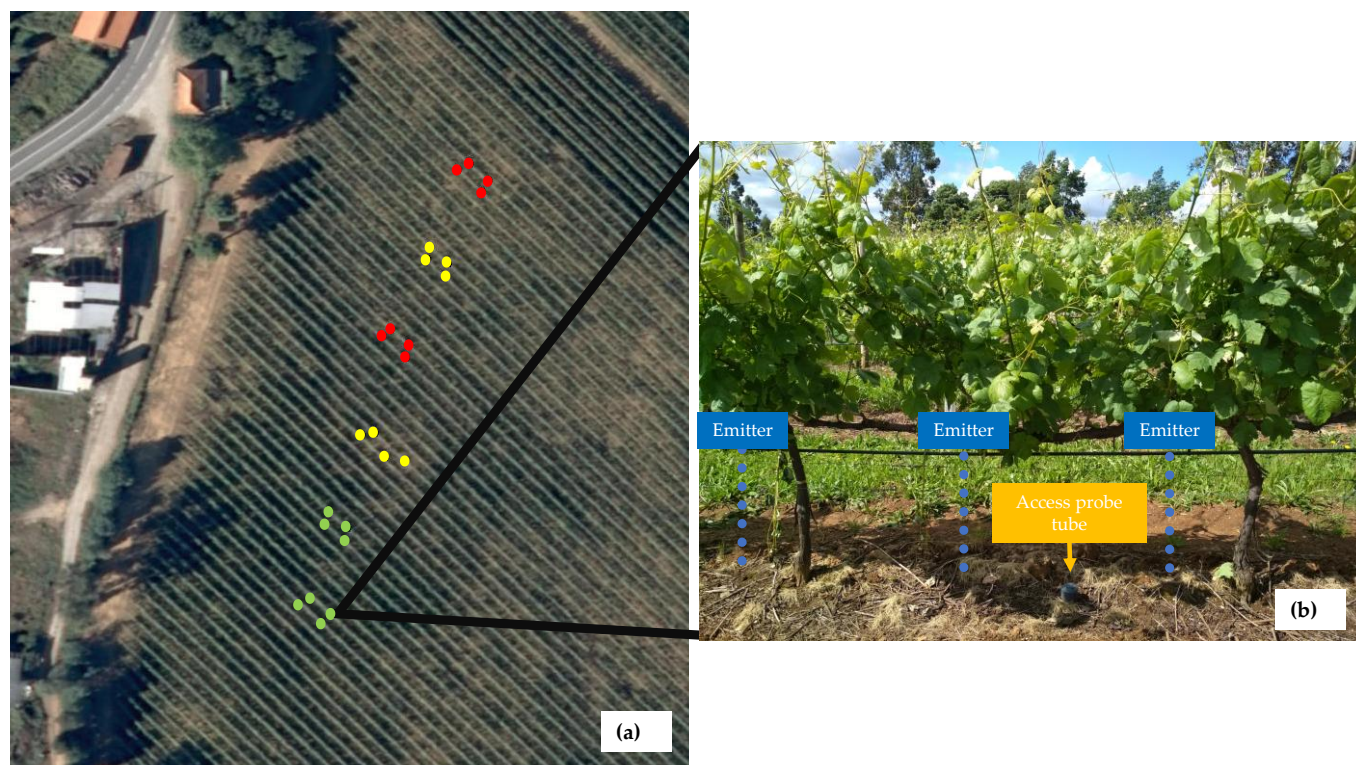


Figure 2. Position of the access probe tubes located in full irrigation (●), deficit irrigation (●), and rain-feed (●) treatments (a). A schematic view of vines, emitters, and access probe tubes (b).

Based on the successive SWC readings carried out with a capacitive probe (Diviner 2000) after the occurrence of high precipitation, the drainage depletion curve for the soil was obtained by applying the power regression method, Equation (9), defined by Liu et al. (2006) [42]:

$$SWC = a \times t^b \quad (9)$$

where SWC represents soil water content in mm, a is soil water storage value comprised between field capacity and saturation of the soil, b represents the velocity of drainage, and t is the time in days. The parameters a and b were defined as 287.05 and -0.056 , respectively. A curve number of 60 was used to calculate the surface runoff [23,43].

Phenological evolution was performed based on the Baggiolini scale [44], which was later adapted to our FAO standard crop growth stages. Therefore, the day when the vine reached stage D (leaf emergence) corresponds to the start of the rapid growth stage [6], and the midseason stage corresponds to the period between phases: I (flowering) and phase M (veraison).

Crop heights (h) (from the soil) and the fraction of soil shaded by the crop (f_c), was determined through visual observation at solar noon and were observed throughout the active growing season. The values at the dates of the crop growth stages are presented in Table 2.

Table 2. Vineyard crop growth stages, height (h), and fraction of the soil covered by the crop in the vineyard (f_c).

| Crop Growth Stages | 2019 | | | 2020 | | |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | Dates | H (m) | f_c | Dates | H (m) | f_c |
| Initiation | 21 March | 1.0 | 0.01 | 1 March | 1.0 | 0.01 |
| Start rapid growth | 26 March | 1.4 | 0.05 | 28 March | 1.2 | 0.05 |
| Start midseason | 6 June | 2.0 | 0.30 | 22 June | 2.0 | 0.30 |
| Start maturity | 2 September | 2.4 | 0.40 | 20 August | 2.4 | 0.40 |
| Harvesting | 23 September | 2.4 | 0.40 | 9 September | 2.4 | 0.40 |

The active ground cover was composed of spontaneous species. In 2019, the density of the active coverage (performed by observation) varied between 10% and 90%, with height varied between 0.02 and 0.25 m between the rows and no active coverage in the row (Table A1, Figure A1). In 2020, the density of active soil cover in the row ranged between 5% and 15%, and the height ranged between 0.05 and 0.10 m. Between the rows, the density ranged from 20% to 85%, and the height ranged between 0.05 and 0.30 m.

2.4. Model Calibration and Validation

The calibration of the SIMDualKc model [20,43,45] was performed by adjusting the crop parameters, basal crop coefficient initial ($K_{cb \text{ full ini}}$), basal crop coefficient midseason ($K_{cb \text{ full mid}}$), basal crop coefficient end ($K_{cb \text{ full end}}$), and p depletion fractions, the soil evaporation parameters, depth of the evaporable layer (Z_e), total evaporable water (TEW) readily evaporable water (REW), and the local conditions of the cv. Loureiro by minimizing the residual deviations between the simulated and observed soil water content [26]. The calibration was performed by minimizing the differences between the observed and simulated SWC values in the treatment R for the year 2019. The validation used previously calibrated parameters in other treatments during 2019 and 2020. After calibration, the values of $K_{cb \text{ gcover}}$, $K_{cb \text{ crop}}$, $K_{cb \text{ (gcover+crop) act}}$ (basal crop and active ground cover coefficient adjusted to climate and actual conditions), and K_e could be determined to study the influence of active ground cover and vineyard, in transpiration and soil evaporation processes.

The procedures to assess the goodness-of-fit of the model were similar to those adopted in previous studies [20,43,45]. Linear regression was performed between the observed and simulated SWC values forced to the origin. A set of goodness-of-fit indicators was used to assess model fitting during the calibration and to evaluate the validation results. The indicators used were the regression coefficient (b), determination coefficient (r^2), root mean square error (RMSE, mm) Equation (10), normalized RMSE (NRMSE, %) average relative error (ARE, %) Equation (11), percent bias of estimation (PBIAS, %) Equation (12), modeling efficiency (EF, dimensionless) Equation (13), average absolute error (AAE, mm) Equation (14) and index of agreement (d_{IA} , dimensionless) Equation (15) between the observed and model-predicted values, respectively (O_i and P_i ($i = 1, 2, \dots, n$)).

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (10)$$

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (11)$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (12)$$

$$EF = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \tag{14}$$

$$dIA = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \tag{15}$$

3. Results

The standard and calibrated crop parameters ($K_{cb \text{ full ini}}$, $K_{cb \text{ full mid}}$, and $K_{cb \text{ full end}}$, p) are presented in Table 3 [6,29]. $K_{cb \text{ full ini}}$ was slightly higher than the standard values, while in the case of $K_{cb \text{ full mid}}$ and $K_{cb \text{ end}}$, the values were similar to those proposed by the authors of [29]. In addition, there was a higher mean p -value than the reference.

Table 3. Standard and calibrated model parameters.

| Parameters | Standard | Source | Calibrated |
|---|----------|--------|------------|
| $K_{cb \text{ full ini}}$ (dimensionless) | 0.20 | | 0.33 |
| $K_{cb \text{ full mid}}$ (dimensionless) | 0.80 | [29] | 0.684 |
| $K_{cb \text{ full end}}$ (dimensionless) | 0.60 | | 0.54 |
| p_{ini} (dimensionless) | 0.45 | | 0.45 |
| p_{mid} (dimensionless) | 0.45 | [6] | 0.54 |
| p_{end} (dimensionless) | 0.45 | | 0.45 |

K_{cb} = basal crop coefficients, p = depletion fraction.

The variations of the different coefficients K_e , $K_{cb \text{ full}}$, and $K_{c \text{ act}}$ are shown in Figure 3, along with the values of precipitation and irrigations. In Figure 3, for each treatment, the stress level (K_s) varied between 0 (maximum stress) and 1 (no stress). In the R and DI treatments, values lower than 1 were obtained in both seasons.

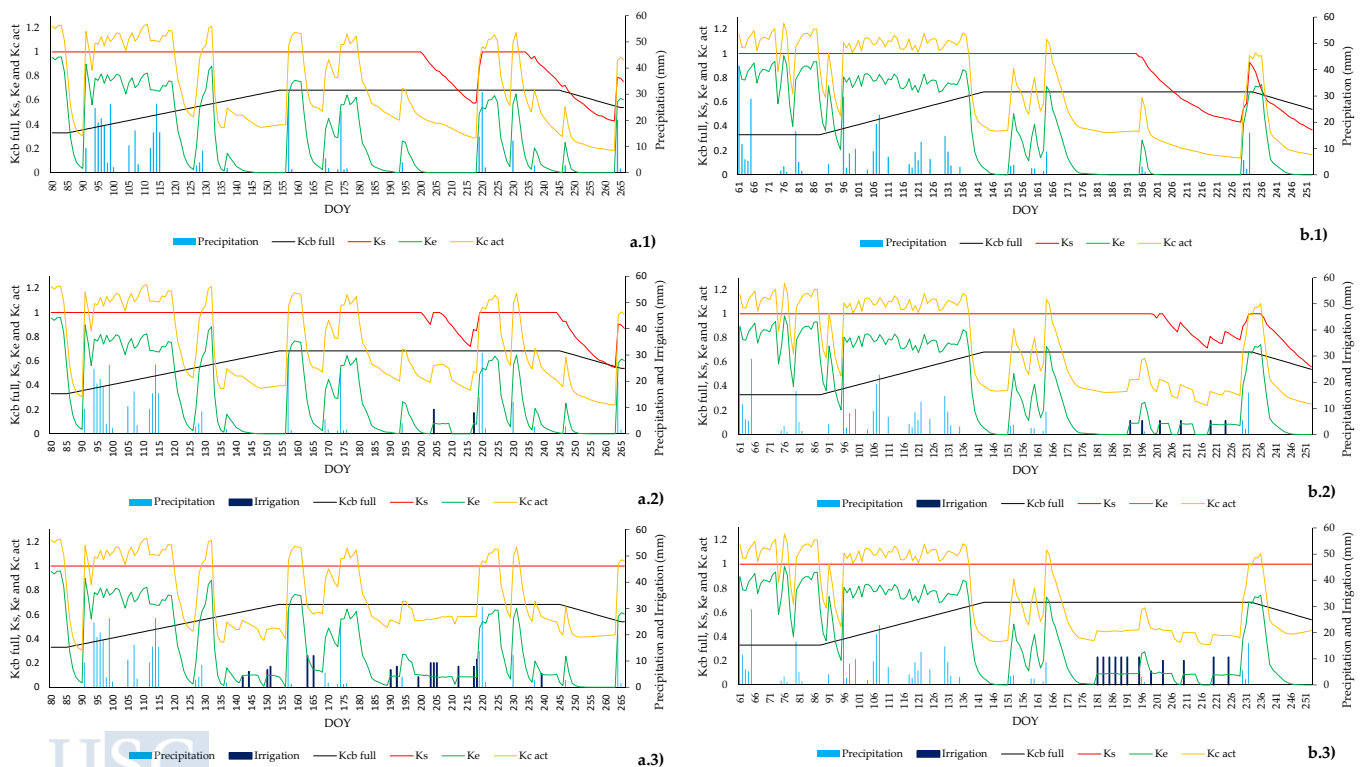


Figure 3. Precipitation (—), irrigation (—), $K_{cb \text{ full}}$ (—), K_s (—), K_e (—), and $K_{c \text{ act}}$ (—) and relative to the: (a) year 2019, (b) year 2020; (1) rainfed (R), (2), deficit irrigation (DI), (3) full irrigation (FI).

The total evaporable water (TEW) used was 17 mm, while the readily evaporable water (REW) used was 10 mm, and the depth of the soil evaporation layer (Z_e) was 0.1 m.

The effect of ground cover variations (Table A1) in $K_{cb\ gcover}$ was negligible and limited to values 0.15–0.27 for both seasons (Table 4). Annual climate conditions modify the $K_{cb\ crop}$, mainly during midseason and end season, with higher values in 2019 than in 2020. In the case of $K_{cb\ (gcover+crop)\ act}$ and K_e , similar values were achieved during initial and rapid growth seasons for both study years (2019 and 2020). To $K_{cb\ (gcover+crop)\ act}$, higher values were determined to FI, with respect to DI, where R treatment showed lower values, to mid and end season. The average K_e values to R treatment were lower than DI and FI treatments during midseason, with slight differences during the end season. The values of K_e during the crop growing stages are directly proportional to SWC.

Table 4. Average values of crop coefficients (-) and precipitation (mm) for different crop growth stages.

| Crop Growth Stages | Dates | 2019 | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|------------------|----------------|------------------------------|------|------|-------|------|------|------------|
| | | $K_{cb\ gcover}$ | $K_{cb\ crop}$ | $K_{cb\ (gcover+crop)\ act}$ | | | K_e | | | Prec. (mm) |
| | | | | R | DI | FI | R | DI | FI | |
| Initial | 21 May/25 May | 0.26 | 0.00 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0 |
| Rapid growth | 26 May/5 June | 0.24 | 0.13 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.40 | 0.40 | 0.42 | 238 |
| Midseason | 6 June/1 September | 0.27 | 0.21 | 0.45 | 0.47 | 0.48 | 0.22 | 0.23 | 0.27 | 131 |
| End season | 2 September/23 September | 0.15 | 0.27 | 0.25 | 0.31 | 0.42 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 25 |
| 2020 | | | | | | | | | | |
| | Dates | $K_{cb\ gcover}$ | $K_{cb\ crop}$ | $K_{cb\ (gcover+crop)\ act}$ | | | K_e | | | Prec. (mm) |
| | | | | R | DI | FI | R | DI | FI | |
| Initial | 1 Mar/27 May | 0.27 | 0.00 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 122 |
| Rapid growth | 28 May/21 June | 0.25 | 0.09 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.52 | 0.52 | 0.52 | 206 |
| Midseason | 22 June/19 August | 0.20 | 0.15 | 0.27 | 0.32 | 0.35 | 0.04 | 0.08 | 0.10 | 28 |
| End season | 20 August/9 September | 0.17 | 0.22 | 0.21 | 0.30 | 0.39 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0 |
| Average 2019–2020 | | 0.23 | 0.13 | 0.30 | 0.38 | 0.40 | 0.40 | 0.41 | 0.42 | 375.1 |

$K_{cb\ gcover}$ = basal crop coefficient of ground cover, $K_{cb\ crop}$ = basal crop coefficient of vineyard, $K_{cb\ (gcover+crop)\ act}$ = actual basal crop coefficient, K_e = soil evaporation coefficient, Prec. = precipitation (mm). R = rainfed, DI = deficit irrigation, and FI = full irrigation treatments.

The results of the observed and simulated SWC values in R 2019, as well as the validation data, can be seen in Figure 4.

In Figure 4, the RAW value was 45 mm at the initial stage, however as the crop approached the midseason, this value increased progressively until reaching 54 mm, remaining stable until the moment of the beginning of maturation, then, it decreased again to 45 mm at the final stage.

The results of the set of goodness-of-fit indicators used to assess model fitting during calibration and to evaluate the validation results are presented in Table 5. In Table 5, the column of the underlined values refers to the calibration performed for the R-2019 treatment, as well as the validations for the other treatments. The b and r^2 values resulting from a forced regression to the origin can be observed, and the values of the indicators EF, RMSE, NRMSE (%), PBIAS (%), dIA, and AAE were obtained from the package of equations presented above (Equations (10)–(15)). The results for the regression coefficient b varied from 0.99 to 1.00, reaching close to 1.0, indicating that predicted and observed values were statistically similar for all crop seasons. The r^2 values ranged from 0.92 to 0.98, indicating that most of the total variance of the observed values was explained by the model. The RMSE values are quite low, ranging from 2.87 to 3.81 mm, indicating that the errors of estimation were small, representing values lower than 3.9% of the TAW. These values, combined with the low NRMSE (ranging from 1.78 to 2.46), indicate low residual errors. The AAE values were also quite small, ranging between 2.21 and 2.99 mm. The PBIAS were very low, indicating a slight underestimation bias in the calibration treatment (PBIAS = 0.57) and a moderate (PBIAS = 1.28) overestimation bias in DI treatment in 2019. Thus, the model did not show a trend for under or overestimation bias.

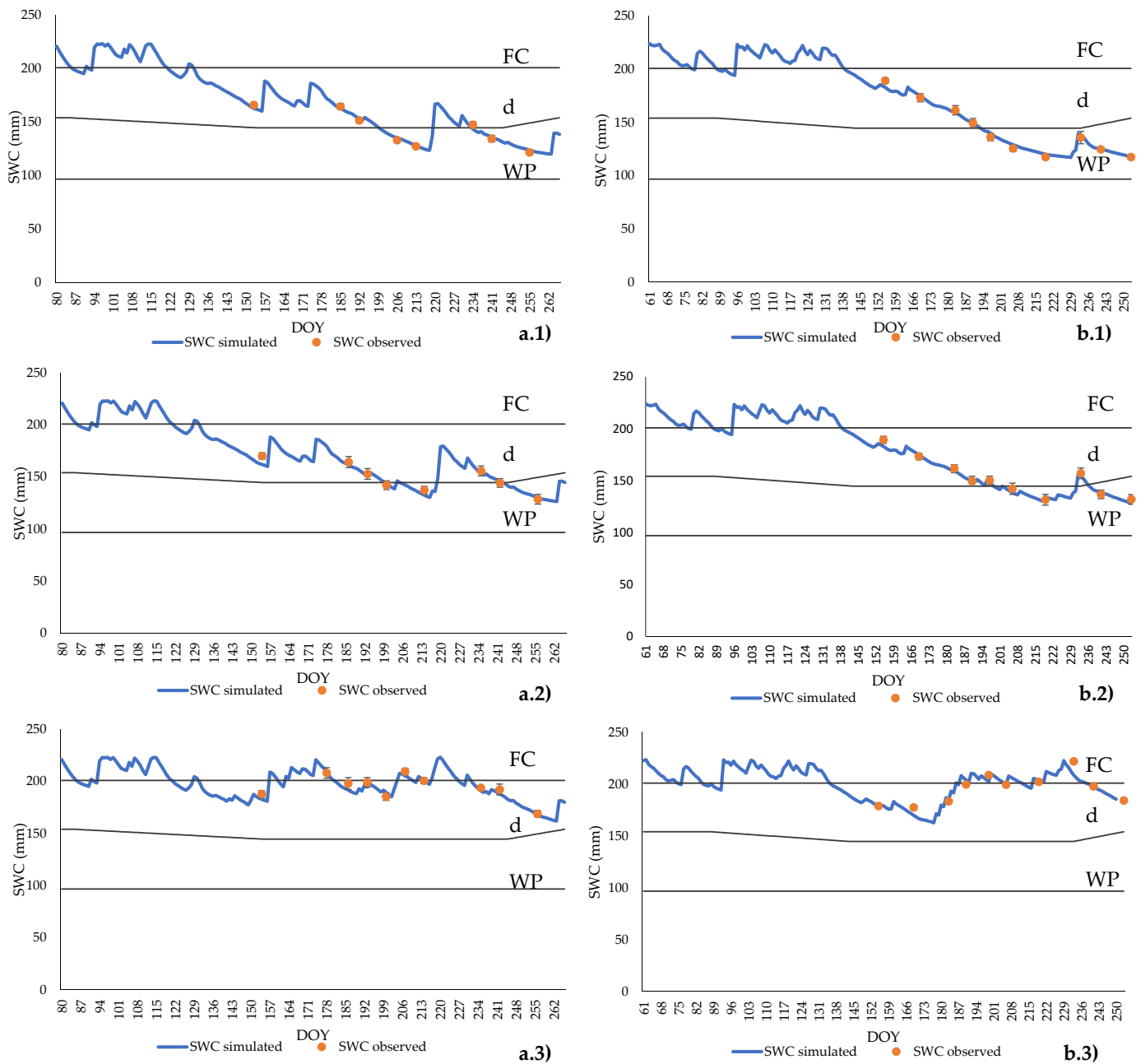


Figure 4. Simulated (—) vs. observed (●) average available soil water content (SWC) relative to the: (a) year 2019, (b) year 2020; (1) rainfed (R), (2) deficit irrigation (DI), (3) full irrigation (FI). DOY represents the day of the year. Error bars represent the standard deviation of the mean observed values. Curves FC, WP, and d represent the soil water content at field capacity, wilting point, and d the soil water content when depletion equals the p fraction, respectively.

Table 5. Goodness-of-fit indicators relative to the SIMDualKc model calibration and validations for the different treatments in the 2019 and 2020 growing seasons.

| | Year | 2019 | | | 2020 | | |
|----------------------------|-----------------|------|------|------|-------|------|------|
| | Treatment | R | DI | FI | R | DI | FI |
| Linear regression | b | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 1.00 |
| | r ² | 0.97 | 0.96 | 0.92 | 0.99 | 0.98 | 0.93 |
| Goodness-of-fit indicators | EF | 0.96 | 0.92 | 0.93 | 0.98 | 0.97 | 0.93 |
| | RMSE (mm) | 2.89 | 3.67 | 3.81 | 2.87 | 3.12 | 3.48 |
| | NRMSE (%) | 2.02 | 2.46 | 1.96 | 2.01 | 2.05 | 1.78 |
| | PBIAS (%) | 0.57 | 1.28 | 0.79 | −0.34 | 0.91 | 0.13 |
| | d _{IA} | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 1.00 | 0.99 | 0.98 |
| | AAE (mm) | 2.26 | 2.92 | 2.66 | 2.21 | 2.69 | 2.99 |

R: rainfed; DI: deficit irrigation; FI: full irrigation; b: regression coefficient, r²: determination coefficient, EF: modeling efficiency; RMSE: root mean square error, NRMSE (%): normalized RMSE of total available water, PBIAS (%): percent bias of estimation; d_{IA}: index of agreement; AAE: average absolute error (mm). Underlined data refer to calibration.

4. Discussion

The values obtained in this study for the HI index were higher than those observed in a study carried out with *Vitis vinifera* cv. Albariño in Rías Baixas (HI average of 1955.6 °C), Spain [46] (northwest Iberian Peninsula). This result indicates that in this region, the temperatures recorded were globally higher; this can be an indicator that distinguishes the regions. Regarding the CI index, it is possible to observe that the average minimum temperatures in September were higher in the Rías Baixas region (average of 14.7 °C) [46]. The Winkler (WI) and Huglin (HI) indices show that temperatures were lower in the year 2019 (Table 1). Associated with these lower temperatures, there was also a slightly lower annual precipitation value, and therefore, the values obtained with the application of the Seljaninov (SI) and Branás (BI) indices were very different in the two years, obtaining in 2019 a higher SI and a lower BI (Table 1). These indexes can explain the differences obtained in K_{c act}. As can be observed in Figure 3, the curve of K_{c act} in strategy R in 2020 (warmest year) generally presents lower values when compared to the same strategy in 2019. The result of SI and BI also explains the lower SWC values in strategy R in 2020 when compared to R in 2019 (Table 1) as well as longer stress periods (Figure 4).

Regarding the standard values, the initial and midseason differences can be compared with the calibrated values. In addition to these differences in the cultural coefficients, the best fit was obtained with equal p depletion fractions, except in midseason. During the midseason, a higher value of p depletion fraction was used, which means that the midseason culture of *Vitis vinifera* cv. Loureiro is less tolerant to water stress than mentioned by the authors of [6] for the generality of *Vitis vinifera* cultivars.

Through Figure 3, it is possible to find moments in the R vineyards (Figure 3(a1,b1)), that were subject to long periods of water stress (K_s < 1); however, in DI vineyards (Figure 3(a2,b2)), the stress periods are lower and have also shorter duration due to the irrigations adding up to compensate water shortages. In FI vineyards, in both years (Figure 3(a3,b3)) there were no moments of water stress. Moreover, in Figure 3, it is possible to find moments, (especially at the initial growth stages) when the K_e values are very similar to K_{c act}, close to 1.2. This fact is observed due to the high rainfall that occurred during these periods (Table 4) as well as the existence of low or no density and height of the soil cover vegetation. Similar trends in K_e and K_c values were observed by the authors of [26], to ‘Godello’ and ‘Mencia’ cultivars in Galicia, NW Spain.

Through the analysis of the results for the two seasons and three treatments (Table 4), K_{cb gcover} and K_{cb crop}, during the mid and end seasons, were limited to their potential values due to long periods of water stress, mainly in R and DI treatments. K_{cb (gcover+crop) act} during the initial stage (0.26), were lower than previous values reported by the authors of [20,47] (≈0.60). During the midseason, the values obtained for the K_{cb (gcover+crop) act}

(0.42) were lower than those presented by the authors of [20], which collected values of 0.65 in this period. This aspect is related to the vineyard management of the Albariño, conducted in a semi-trellised system, compared to the trellis system of the Loureiro in our study. On the contrary, in the end season, slightly higher mean values of $K_{cb (gcover+crop) act}$ are obtained for the FI treatment (0.41), being similar for the DI treatment (0.30) compared to the mean value obtained by Fandiño et al. [20] ($K_{cb (gcover+crop) act} = 0.30$). The higher values in FI treatment are due to a greater vegetative development of the vineyard during end season, where a $K_{cb crop}$ was obtained (0.25), compared to the lower value, obtained by Fandiño et al. [20], with an average value of 0.14, but similar to the work of [26] with $K_{cb vine end}$ of 0.22, to 'Godello' and 'Mencia' cultivars in Galicia, NW Spain.

In relation to basal crop coefficients, similar values of $K_{cb crop}$ (0.18) during the midseason were obtained by Yunusa et al. [47] (0.17) to 'Sultana' vineyard with a 40% of ground cover in Australia. Other authors reported higher values for $K_{cb mid}$ in wine grapes: the authors of [26] report $K_{cb vine mid} = 0.25$, the work of [48] reports $K_{cb mid}$ around 0.50. However, $K_{cb crop end}$ is much smaller than values reported by the authors of [48] in a 'Riesling' vineyard in the New York State, USA, who found $K_{cb crop end}$ values of 0.55.

In Figure 4, a suitable approximation between the simulated and measured SWC values can be observed, indicating that the model can predict the SWC values throughout the vineyard season using the various irrigation strategies. The values obtained by the capacitive probe demonstrate the existence of a very low error, so we can conclude that the amount of water in the soil did not vary significantly between repetitions. The $K_{cb full ini}$ (0.33) calibrated value was slightly higher to the initial period than values obtained by the authors of [20] (0.30) and relative higher to FAO-56 [6] standard values (0.20). This value is higher depending on the rainfall and active ground cover conditions. To the midseason, $K_{cb full mid}$ value (0.684) was lower than values obtained by the authors of [20] (1.15) and [26] (0.75), mainly due to active ground cover conditions and crop development. Similarly, to end season, lower values were obtained to $K_{cb full end}$ (0.54) when compared with [20] (0.90) and [26] (0.60). Final report values to $K_{cb full}$ were near to 'Godello' and 'Mencia' cultivars values, with similar trellis management, so that the vineyard management (trellis and active ground cover) is presented as a key factor to select the correct crop coefficients when not available to use, instead of standard values of FAO-56 [6].

The indicators obtained from the forced regression to the origin show a suitable agreement between the observed and the simulated data. The other indicators (EF, RMSE, NRMSE, PBIAS, d_{IA} , and AAE) demonstrate that, after a previous calibration, the model can efficiently predict the SWC throughout the crop cycle using the various irrigation strategies. The b and r^2 values in the present work are better than those reported by the authors of [26], who obtained b values between 0.92 and 1.04, and r^2 values between 0.87 and 0.97 for grapevine with active ground cover. The efficiency of the model (EF) in the present study ranged between 0.92 and 0.97, whereas the authors of [26] obtained slightly lower values between 0.77 and 0.96. The results obtained in this work are similar to those obtained with other methodologies, for example, with the results obtained by the authors of [11], who also studied vine culture. However, the accuracy of the double model approach was verified using lysimeters and with the results obtained for the cultivation of Arbequina olive [9].

Considering the totality of the indicators calculated to assess the robustness of the model, it is possible to verify that, whatever the irrigation strategy (R, DI, or FI) or year of cultivation (2019 or 2020), the values obtained by these indicators indicate a suitable fit of the model.

5. Conclusions

Considering the specific parameters of the study field (soil, climate, crop, and irrigation), the calibration and validation of the SIMDualKc model were successfully performed for *Vitis vinifera* cv. Loureiro. In the 2 years of the field studies, 2019 and 2020, a goodness

of fit was obtained between the SWC values observed with a capacitive probe and those simulated with the SIMDualKc model.

After making the necessary adjustments to the standard values [6], we obtained a suitable approximation between the real and simulated values. We conclude that the application of the dual approach with the SIMDualKc model is possible because, as other authors have noted, the model can correctly predict the SWC.

These values enable the determination of the SWC in future growth seasons, facilitating irrigation management by allowing farmers to adapt their management practices to achieve the levels of water stress that they want for their vineyard.

The use of calibrated parameters for cv. Loureiro allows farmers to efficiently use water. However, it is still necessary to carry out studies in the future to determine the vine response to the different levels of water stress generated in each irrigation treatment.

To facilitate the application of this calibration, it is recommended to round the values of $K_{cb \text{ full ini}}$, $K_{cb \text{ full mid}}$, and $K_{cb \text{ full end}}$ to 0.35, 0.70, and 0.55, respectively.

Author Contributions: Conceptualization, M.I.V. and J.J.C.; methodology, S.P.S. and J.J.C.; software, S.P.S. and J.J.C.; validation, S.P.S., S.M., and M.I.V.; formal analysis, S.P.S. and M.I.V.; investigation, S.P.S. and M.I.V.; data curation, S.P.S., M.I.V., and C.A.-P.; writing—original draft preparation, S.P.S.; writing—review and editing, J.J.C. and M.I.V. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The APC was funded by Consellería de Cultura, Educación e Universidade, Xunta de Galicia (Grupos de Referencia Competitiva ED431C-2021-27).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Acknowledgments: This work is a result of the project TECH—Technology, Environment, Creativity and Health, Norte-01-0145-FEDER-000043, supported by Norte Portugal Regional Operational Program (NORTE 2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund (ERDF). UIDB/05937/2020 and UIDP/05937/2020—Centre for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability—funded by national funds, through FCT—Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Appendix A

In order to complement our manuscript, in relation to the state of the active ground cover, in the row and inter-row of the study vineyard, Table A1 is incorporated below.

Moreover, Figure A1 shows the evolution of density and height of active ground cover in the inter-row. The information was introduced in the SIMDualKc model to calibrate and validate the parameters required and used in the Results and Discussion sections of the manuscript. The percentages in crop row and in inter-row fraction with cover at peak canopy were from 0% to 55% for 2019 and 10% to 50% for 2020, respectively.

Table A1. Density and height of the green active ground cover for the 2 experimental seasons (2019–2020). Row and inter-row data.

| Year | DOY | CC_dens_Row | CC_dens_InterRow | CC_Height_Row (m) | CC_Height_intRow (m) |
|------|-----|-------------|------------------|-------------------|----------------------|
| 2019 | 80 | 0 | 0.50 | 0 | 0.05 |
| | 91 | 0 | 0.50 | 0 | 0.08 |
| | 106 | 0 | 0.80 | 0 | 0.11 |
| | 109 | 0 | 0.90 | 0 | 0.18 |
| | 112 | 0 | 0.90 | 0 | 0.15 |
| | 127 | 0 | 0.90 | 0 | 0.20 |
| | 133 | 0 | 0.10 | 0 | 0.02 |
| | 142 | 0 | 0.80 | 0 | 0.20 |
| | 148 | 0 | 0.40 | 0 | 0.10 |
| | 154 | 0 | 0.40 | 0 | 0.20 |
| | 162 | 0 | 0.10 | 0 | 0.10 |
| | 166 | 0 | 0.70 | 0 | 0.15 |
| | 178 | 0 | 0.90 | 0 | 0.15 |
| | 186 | 0 | 0.90 | 0 | 0.25 |
| | 193 | 0 | 0.40 | 0 | 0.08 |
| | 200 | 0 | 0.50 | 0 | 0.12 |
| | 207 | 0 | 0.70 | 0 | 0.15 |
| | 214 | 0 | 0.70 | 0 | 0.15 |
| | 235 | 0 | 0.90 | 0 | 0.25 |
| | 248 | 0 | 0.10 | 0 | 0.05 |
| 266 | 0 | 0.10 | 0 | 0.05 | |
| 2020 | 61 | 0.05 | 0.80 | 0.1 | 0.25 |
| | 75 | 0.05 | 0.80 | 0.10 | 0.30 |
| | 132 | 0.05 | 0.80 | 0.05 | 0.10 |
| | 137 | 0.05 | 0.20 | 0.05 | 0.05 |
| | 143 | 0.05 | 0.50 | 0.05 | 0.10 |
| | 156 | 0.10 | 0.75 | 0.05 | 0.15 |
| | 170 | 0.15 | 0.85 | 0.05 | 0.20 |
| | 184 | 0.15 | 0.50 | 0.05 | 0.10 |
| | 198 | 0.15 | 0.65 | 0.05 | 0.15 |
| | 206 | 0.15 | 0.85 | 0.05 | 0.25 |
| | 219 | 0.10 | 0.40 | 0.05 | 0.10 |
| | 233 | 0.05 | 0.20 | 0.05 | 0.10 |
| | 241 | 0.05 | 0.40 | 0.05 | 0.10 |
| | 253 | 0.05 | 0.40 | 0.05 | 0.10 |

CC_dens_Row: density of active ground cover in the row; CC_dens_InterRow: density of active ground cover in the inter-row; CC_Height_Row: height of the active ground cover in the row (m); CC_Height_intRow: height of the active ground cover in the row (m); DOY represents the day of the year.

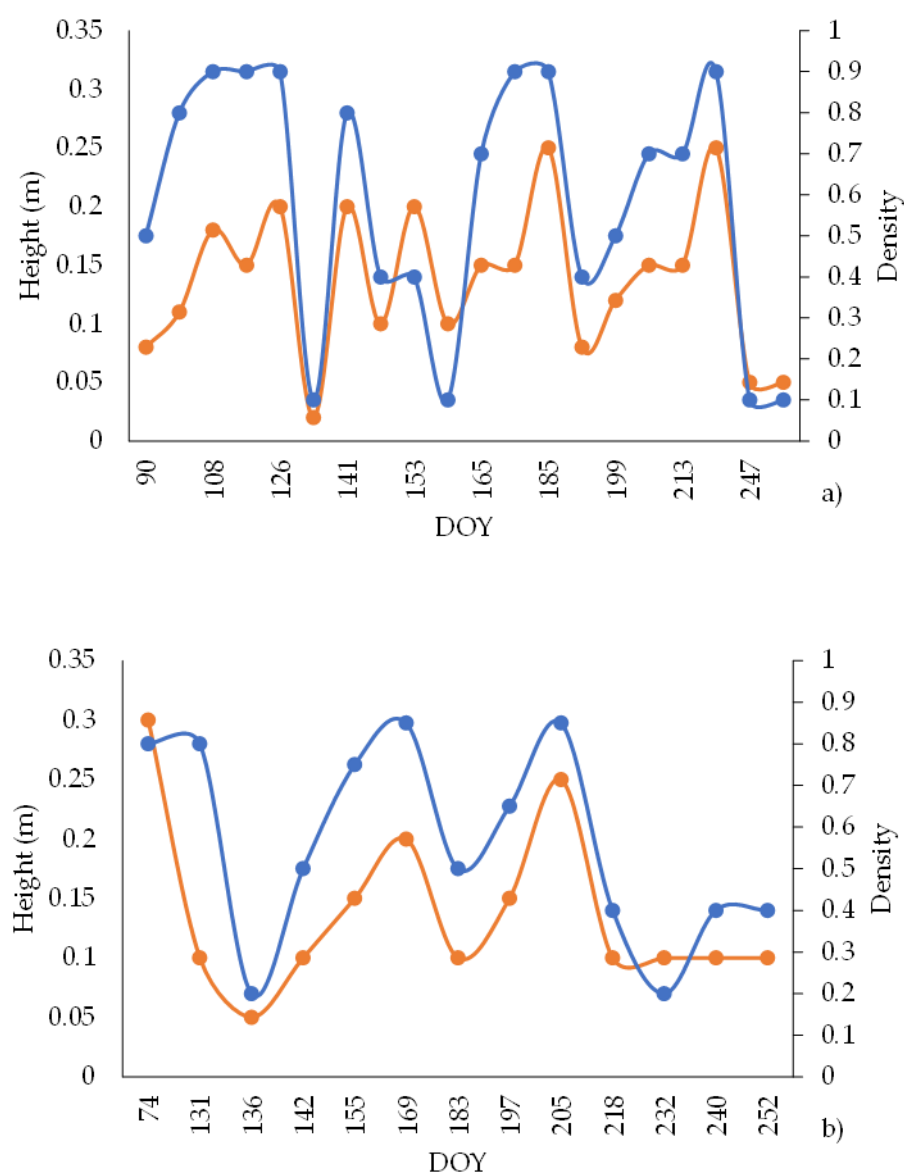


Figure A1. Evolution of active ground height (—○—) and density (—●—) in the vineyard inter-row relative to: (a) 2019, (b) 2020.

References

- Oliveira, A.F.; Mameli, M.G.; Cascio, M.L.; Sirca, C.; Satta, D. An Index for User-Friendly Proximal Detection of Water Requirements to Optimized Irrigation Management in Vineyards. *Agronomy* **2021**, *11*, 323. [[CrossRef](#)]
- Kim, S.; Meki, M.N.; Kim, S.; Kiniry, J.R. Crop modeling application to improve irrigation efficiency in year-round vegetable production in the texaswinter garden region. *Agronomy* **2020**, *10*, 1525. [[CrossRef](#)]
- Nesheim, I.; Barkved, L. The suitability of the ecosystem services framework for guiding benefit assessments in human-modified landscapes exemplified by regulated watersheds-Implications for a sustainable approach. *Sustainability* **2019**, *11*, 1821. [[CrossRef](#)]
- Islam, S.M.F.; Karim, Z. World's Demand for Food and Water: The Consequences of Climate Change. *IntechOpen* **2019**, *13*. [[CrossRef](#)]
- Pereira, L.S.; Oweis, T.; Zairi, A. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manag.* **2002**, *57*, 175–206. [[CrossRef](#)]
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Smith, M.; Raes, D. Crop Evapotranspiration. Guide- lines for Computing Crop Water Requirements Paper 56. *FAO Irrig. Drain.* **1998**, *300*, D05109.
- Pereira, L.S.; Paredes, P.; Melton, F.; Johnson, L.; Wang, T.; López-Urrea, R.; Cancela, J.J.; Allen, R.G. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. *Agric. Water Manag.* **2020**, *241*, 106197. [[CrossRef](#)]

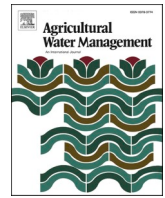
8. Paço, T.A.; Pôças, I.; Cunha, M.; Silvestre, J.C.; Santos, F.L.; Paredes, P.; Pereira, L.S. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *J. Hydrol.* **2014**, *519*, 2067–2080. [[CrossRef](#)]
9. Paço, T.A.; Paredes, P.; Pereira, L.S.; Silvestre, J.; Santos, F.L. Crop coefficients and transpiration of a super intensive Arbequina olive orchard using the dual Kc approach and the Kcb computation with the fraction of ground cover and height. *Water* **2019**, *11*, 383. [[CrossRef](#)]
10. López-Urrea, R.; Sánchez, J.M.; de la Cruz, F.; González-Piqueras, J.; Chávez, J.L. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements for sprinkler-irrigated canola. *Agric. Water Manag.* **2020**, *239*, 106260. [[CrossRef](#)]
11. López-Urrea, R.; Montoro, A.; Mañas, F.; López-Fuster, P.; Fereres, E. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature “Tempranillo” wine grapes. *Agric. Water Manag.* **2012**, *112*, 13–20. [[CrossRef](#)]
12. Rallo, G.; Provenzano, G.; Castellini, M.; Sirera, A.P. Application of EMI and FDR sensors to assess the fraction of transpirable soil water over an olive grove. *Water* **2018**, *10*, 168. [[CrossRef](#)]
13. Provenzano, G.; Rallo, G.; Ghazouani, H. Assessing Field and Laboratory Calibration Protocols for the Diviner 2000 Probe in a Range of Soils with Different Textures. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2016**, *142*, 04015040. [[CrossRef](#)]
14. Zhuang, Q.; Wu, S.; Feng, X.; Niu, Y. Analysis and prediction of vegetation dynamics under the background of climate change in Xinjiang, China. *PeerJ* **2020**, *8*, e8282. [[CrossRef](#)]
15. Garcia, L.; Celette, F.; Gary, C.; Ripoché, A.; Valdés-Gómez, H.; Metay, A. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2018**, *251*, 158–170. [[CrossRef](#)]
16. Lopes, C.M.; Santos, T.P.; Monteiro, A.; Rodrigues, M.L.; Costa, J.M.; Chaves, M.M. Combining cover cropping with deficit irrigation in a Mediterranean low vigor vineyard. *Sci. Hortic.* **2011**, *129*, 603–612. [[CrossRef](#)]
17. Gattullo, C.E.; Mezzapesa, G.N.; Stellacci, A.M.; Ferrara, G.; Occhiogrosso, G.; Petrelli, G.; Castellini, M.; Spagnuolo, M. Cover crop for a sustainable viticulture: Effects on soil properties and table grape production. *Agronomy* **2020**, *10*, 1334. [[CrossRef](#)]
18. Pou, A.; Gulías, J.; Moreno, M.; Tomás, M.; Medrano, H.; Cifre, J. Cover cropping in *Vitis vinifera* L. cv. Manto Negro vineyards under Mediterranean conditions: Effects on plant vigour, yield and grape quality. *J. Int. Des. Sci. La Vigne Du Vin* **2011**, *45*, 223–234. [[CrossRef](#)]
19. Sivcev, B.; Sivcev, I.; Rankovic-Vasic, Z. Plant protection products in organic grapevine growing. *J. Agric. Sci. Belgrade* **2010**, *55*, 103–122. [[CrossRef](#)]
20. Fandiño, M.; Cancela, J.J.; Rey, B.J.; Martínez, E.M.; Rosa, R.G.; Pereira, L.S. Using the dual-K c approach to model evapotranspiration of Albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albariño) with consideration of active ground cover. *Agric. Water Manag.* **2012**, *112*, 75–87. [[CrossRef](#)]
21. French, A.N.; Hunsaker, D.J.; Sanchez, C.A.; Saber, M.; Gonzalez, J.R.; Anderson, R. Satellite-based NDVI crop coefficients and evapotranspiration with eddy covariance validation for multiple durum wheat fields in the US Southwest. *Agric. Water Manag.* **2020**, *239*, 106266. [[CrossRef](#)]
22. Raes, D. *Book I: Understanding AquaCrop*; FAO: Rome, Italy, 2017; ISBN 9789251093900.
23. Rosa, R.D.; Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Fernando, R.M.; Alves, I.; Pereira, L.S.; Allen, R.G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. *Agric. Water Manag.* **2012**, *103*, 62–77. [[CrossRef](#)]
24. Rolim, J.; Godinho, P.; Sequeira, B.; Paredes, P.; Pereira, L.S. Assessing the SIMDualKc model for irrigation scheduling simulation in Mediterranean environments. *Water Sav. Mediterr. Agric. Futur. Res. Needs* **2007**, *1*, 49–61.
25. Fandiño, M.; Olmedo, J.L.; Martínez, E.M.; Valladares, J.; Paredes, P.; Rey, B.J.; Mota, M.; Cancela, J.J.; Pereira, L.S. Assessing and modelling water use and the partition of evapotranspiration of irrigated hop (*Humulus Lupulus*), and relations of transpiration with hops yield and alpha-acids. *Ind. Crops Prod.* **2015**, *77*, 204–217. [[CrossRef](#)]
26. Cancela, J.J.; Fandiño, M.; Rey, B.J.; Martínez, E.M. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Mencía). *Agric. Water Manag.* **2015**, *151*, 52–63. [[CrossRef](#)]
27. Allen, R.G.; Pruitt, W.O.; Wright, J.L.; Howell, T.A.; Ventura, F.; Snyder, R.; Itenfisu, D.; Steduto, P.; Berengena, J.; Yrisarry, J.B.; et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manag.* **2006**, *81*, 1–22. [[CrossRef](#)]
28. Allen, R.G.; Clemmens, A.J.; Burt, C.M.; Solomon, K.; O’Halloran, T. Prediction Accuracy for Projectwide Evapotranspiration Using Crop Coefficients and Reference Evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.* **2005**, *131*, 24–36. [[CrossRef](#)]
29. Allen, R.G.; Pereira, L.S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrig. Sci.* **2009**, *28*, 17–34. [[CrossRef](#)]
30. Rallo, G.; Paço, T.A.; Paredes, P.; Puig-Sirera, À.; Massai, R.; Provenzano, G.; Pereira, L.S. Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. *Agric. Water Manag.* **2021**, *250*, 106645. [[CrossRef](#)]
31. Pereira, L.S.; Paredes, P.; Hunsaker, D.J.; López-Urrea, R.; Jovanovic, N. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agric. Water Manag.* **2021**, *248*, 106697. [[CrossRef](#)]
32. Fraga, H.; Malheiro, A.C.; Moutinho-Pereira, J.; Santos, J.A. Climate factors driving wine production in the Portuguese Minho region. *Agric. For. Meteorol.* **2014**, *185*, 26–36. [[CrossRef](#)]
33. Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Zeitschrift* **2006**, *15*, 259–263. [[CrossRef](#)]

34. Cardoso, A.S.; Alonso, J.; Rodrigues, A.S.; Araújo-Paredes, C.; Mendes, S.; Valín, M.I. Agro-ecological terroir units in the North West Iberian Peninsula wine regions. *Appl. Geogr.* **2019**, *107*, 51–62. [[CrossRef](#)]
35. Winkler, A.J.; Cook, J.A.; Kliewer, W.M.; Lider, L.A. *General Viticulture*, 4th ed.; University of California Press: Berkley, CA, USA, 1974; ISBN 9780520025912.
36. Huglin, P. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus L'académie D'agriculture Fr.* **1978**, *64*, 1117–1126.
37. Tonietto, J. *Les Macroclimats Viticoles Mondiaux et L'influence du Mésoclimat sur la Typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le Sud de la France: Méthodologie de Caractérisation*; Ecole Nationale Supérieure Agronomique De Montpellier: E.N.S.A: Montpellier, France, 1999.
38. Seljaninovic, G.T. *Agroclimatic Map of the World*; Hydrometeoizdat Publishing House: Leningrad, Russia, 1966.
39. Branas, J.; Bernon, G.; Levadoux, L. *Eléments de Viticulture Générale*; Imp. Dehan: Bordeaux, France, 1946.
40. WRB World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resources Reports 106*; FAO: Rome, Italy, 2014; ISBN 9789251083697.
41. Evett, S.R.; Stone, K.C.; Schwartz, R.C.; O'Shaughnessy, S.A.; Colaizzi, P.D.; Anderson, S.K.; Anderson, D.J. Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: Implications for irrigation management. *Irrig. Sci.* **2019**, *37*, 751–759. [[CrossRef](#)]
42. Liu, Y.; Pereira, L.S.; Fernando, R.M. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agric. Water Manag.* **2006**, *84*, 27–40. [[CrossRef](#)]
43. Rosa, R.D.; Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Alves, I.; Fernando, R.M.; Pereira, L.S.; Allen, R.G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agric. Water Manag.* **2012**, *103*, 8–24. [[CrossRef](#)]
44. Baggiolini, M.; Lorenz, H.; Bleiholder, H.; T., V.D.B.; Stauss, R.; Weber, E.; Witzemberger, A.; Hack, H.; Bleiholder, H.; Buhr, L.; et al. Stades phénologiques repères de la vigne. *Arboric. Hortic.* **1993**, *44*, 7–9.
45. Paredes, P.; Rodrigues, G.J.; Petry, M.T.; Severo, P.O.; Carlesso, R.; Pereira, L.S. Evapotranspiration partition and crop coefficients of Tifton 85 bermudagrass as affected by the frequency of cuttings. Application of the FAO56 dual Kc model. *Water* **2018**, *10*, 558. [[CrossRef](#)]
46. Cancela, J.J.; Trigo-Córdoba, E.; Martínez, E.M.; Rey, B.J.; Bouzas-Cid, Y.; Fandiño, M.; Mirás-Avalos, J.M. Effects of climate variability on irrigation scheduling in white varieties of *Vitis vinifera* (L.) of NW Spain. *Agric. Water Manag. J.* **2016**, *170*, 99–109. [[CrossRef](#)]
47. Yunusa, I.A.M.; Walker, R.R.; Guy, J.R. Partitioning of seasonal evapotranspiration from a commercial furrow-irrigated Sultana vineyard. *Irrig. Sci.* **1997**, *18*, 45–54. [[CrossRef](#)]
48. Intrigliolo, D.S.; Lakso, A.N.; Piccioni, R.M. Grapevine cv. "Riesling" water use in the northeastern United States. *Irrig. Sci.* **2009**, *27*, 253–262. [[CrossRef](#)]

4.2 WATER PRODUCTIVITY IN *VITIS VINIFERA* L. CV. ALVARINHO USING DUAL CROP COEFFICIENT APPROACH

Este capítulo corresponde ao seguinte artigo de investigação:

- **Título:** Water productivity in *Vitis vinifera* L. cv. Alvarinho using dual crop coefficient approach
- **Revista:** Agricultural Water Management, Volume 303, 1 October 2024, 109027
- **Editora:** Elsevier
- **ISSN:** 0378-3774
- **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109027>
- **Autores:** Simão P. Silva ^{1,3}, M. Isabel Valín ¹, Susana Mendes ¹, Cláudio Araujo-Paredes ² and Javier J. Cancela ³
- **Institutions:**
 - ¹Centre for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal
 - ²Research Unit in Materials, Energy and Environment for Sustainability (PROMETHEUS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal;
 - ³GI-1716 Projects and Planification, Agroforestry Engineering Department, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Lugo, University of Santiago de Compostela, 27002 Lugo, Spain
- **Contribuição dos autores:**
 - Simão P. Silva:** Revisão e edição, Escrita – rascunho original, Validação, Software, Metodologia, Investigação, Análise formal, tratamento de dados
 - M. Isabel Valín:** Revisão e edição, validação, investigação, análise formal, tratamento de dados, conceptualização.
 - Susana Mendes:** Revisão e edição, Validação.
 - Cláudio Araujo-Paredes:** Redação – revisão e edição, tratamento de dados.
 - Javier J. Cancela:** Revisão e edição, Software, Metodologia, Conceptualização.
- **Indicadores (2024):** Fator de impacto, IF: 6.4; Primeiro quartil (Q1; 4/129) desta categoria (Agronomy). Citações: 2.
- **Autorização da editora:** Este artigo é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite a sua utilização, distribuição e reprodução sem restrições em qualquer meio ou formato, para qualquer fim, sem necessidade de autorização específica. Da mesma forma, de acordo com as políticas de direitos de autor da Elsevier (<https://www.elsevier.com/about/policies-and-standards/copyright>), a editora do artigo, os autores têm o direito de utilizar e partilhar os seus trabalhos para fins académicos, incluindo em teses.



Water productivity in *Vitis vinifera* L. cv. Alvarinho using dual crop coefficient approach

Simão P. Silva^{a,c}, M. Isabel Valín^a, Susana Mendes^a, Cláudio Araujo-Paredes^b,
Javier J. Cancela^{c,*}

^a Center for Research and Development, in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Rua Escola Industrial e Comercial de Nun'Alvares, Viana do Castelo 4900-347, Portugal

^b Research Unit in Materials, Energy and Environment for Sustainability (PROMETHEUS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Rua Escola Industrial e Comercial de Nun'Alvares, Viana do Castelo 4900-347, Portugal

^c GI-1716 Projects and Planification, Agroforestry Engineering Department, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Lugo, University of Santiago de Compostela, Spain

ARTICLE INFO

Handling Editor: Dr Z Xiyang

Keywords:

Cover crop
Crop water deficit, Crop water requirement modelling
Deficit irrigation
Soil water content
Water stress
SIMDualKc

ABSTRACT

Water productivity (WP) measurement determines the efficiency of water use by assessing the ratio of the crop yield to the amount of water used in production. The objective of this study was to identify the optimal irrigation treatment for *Vitis vinifera* L. cv. Alvarinho with ground cover in Northern Portugal, with a focus on water productivity. Two irrigation treatments (full irrigation—FI; deficit irrigation—DI) and a control (rainfed—R) were considered. The FI strategy represented the standard irrigation carried out by the vinegrower, based on the water availability and their experience. The cover crop was a variable factor, evaluated in terms of both height and density, both within the crop row and between the rows. In each of the treatments, the available soil water content (ASW) was measured in eight locations in the field throughout the growing season using a capacitive probe (Diviner 2000) previously calibrated. These measurements were used to calibrate the SIMDualKc model, which employed the dual crop coefficient approach. The successful calibration of the model, carried out with treatment R in 2018, was evidenced by the strong correlation between the ASW measured through the capacitive probe and that simulated by SIMDualKc ($b=0.988$ and $r^2=0.995$). After the model's calibration, the separation between the transpiration and evaporation components was determined. The maximum transpiration during the growing season was observed in the full irrigation treatment. In this context, the study proceeded to apply the soil water balance components and transpiration generated by the model in the calculation of the WP. The fruit yield productivity was determined by accounting for the total water use in the growing season. The total water used was calculated by combining the volumes of water applied for irrigation and precipitation and the soil water extracted during the growing season by crops and cover crops. The deficit irrigation strategy showed the best performance in both years, with WP values of 3.31 and 1.81 kg m⁻³ for the years 2018 and 2019, respectively. Therefore, the study concluded that deficit irrigation proved to be the most effective irrigation strategy in terms of water productivity and crop water use efficiency (WUE_c).

1. Introduction

Water plays a crucial role in agricultural production as a valuable resource, with this sector accounting for the majority of water withdrawals, representing approximately 70 % of the total worldwide water consumption. However, given the challenges posed by climate change, there is an inevitable need to curtail this consumption through the implementation of efficient water management practices (Fischer et al., 2007; Bwambale et al., 2022). To safeguard the future of this essential

resource, it is imperative to foster sustainability in water use across all sectors, with a particular emphasis on agriculture (Brown et al., 2011; FAO and WWC, 2015). Precision irrigation can improve the sustainability of water usage by employing equipment and sensors such as soil water sensors (Beyá-Marshall et al., 2022), pressure chambers (Lakso et al., 2022), meteorological weather stations (Djaman et al., 2018) and drones (Araújo-Paredes et al., 2022). These technologies enable the collection of crucial data for irrigation decision-making, including the soil water content, leaf water potential, evapotranspiration and

* Corresponding author.

E-mail address: javierjose.cancela@usc.es (J.J. Cancela).

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109027>

Received 13 February 2024; Received in revised form 19 August 2024; Accepted 20 August 2024

Available online 26 August 2024

0378-3774/© 2024 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

normalized vegetation index. This approach significantly reduces water wastage and improves the overall efficiency (Acevedo-Opazo et al., 2010 and González Perea et al., 2018). Precision irrigation is becoming crucial to address climate change. Although certain aspects of climate change, such as increased precipitation, may offer localized benefits, there are also adverse impacts, including reduced water availability and more frequent extreme weather events (Alcama et al., 2007; Iglesias and Garrote, 2015). Given that climate change is recognized as one of the most significant environmental challenges of this century (KPMG International, 2012), there is a need to evaluate the impact and efficiency of water use in the agricultural sector (Civit et al., 2018; Chen et al., 2023; Fatichi et al., 2023).

To evaluate the water efficiency in agriculture, the water productivity (WP) and crop water use efficiency (WUE_c) methods are frequently employed (Junquera et al., 2012; Trout and DeJonge, 2017; Fatichi et al., 2023). The WP is expressed as the ratio between the yield and the water used or between the value of the product and the water used. The optimal WP outcome is attained by reducing the water consumption per unit of grape production, provided that it does not compromise other factors, such as quality (Rodrigues and Pereira, 2009; Pereira et al., 2020a; Fernández, 2023). The WP has been employed as a tool for water management in various crops, including wheat, maize and potatoes (Zhang et al., 2021), apples (Zhou et al., 2023) and olives (Fernández et al., 2020) and in the Atlantic viticulture (Buesa et al., 2017; Soltekin et al., 2020). In addition, the crop density and training system have been reported as factors influencing the WP, as well as crop evapotranspiration, in various crops, such as apple (Jiang and He, 2021) and grapevine (Yuste et al., 2004; Prieto et al., 2020). Several studies suggest that the application of deficit irrigation strategies has a positive impact on water productivity and can also improve the quality of grapes (Shellie, 2014; Phogat et al., 2017; Ma et al., 2023).

To ensure efficient water use, a comprehensive understanding of the actual crop water requirements, including the crop evapotranspiration during the crop season, is crucial (Allen et al., 1998; Fatichi et al., 2023). As mentioned by Fernández (2023), the terms crop water use efficiency (WUE_c) and water productivity (WP) are often confused; for this reason, the correct definition of a numerator and denominator is required (Pereira et al., 2020). To calculate the WUE_c, the numerator should contain the actual crop evapotranspiration and the denominator should contain the sum of the irrigation applied and the total precipitation during the season.

The actual crop evapotranspiration can be obtained using the dual crop coefficient approach (Allen et al., 1998). This approach has already been applied to several crops (Rosa et al., 2012a; Rallo et al., 2021; Silva et al., 2021). The actual crop evapotranspiration (ET_{c act}) is determined using Eq. (1), which incorporates the actual crop coefficient (K_{cb act}) (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2021a).

$$ET_{c \text{ act}} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o = K_{c \text{ act}} \times ET_o \quad (1)$$

where ET_{c act} represents the actual crop evapotranspiration; K_s represents the water stress coefficient, ranging between 0 and 1.0; K_{cb} represents the basal crop coefficient; K_e is the soil evaporation coefficient; ET_o represents the reference evapotranspiration; and K_{c act} is the actual crop coefficient.

The total evapotranspiration is determined via the water requirements for crop growth (K_{cb crop}), the establishment of ground cover vegetation (K_{cb gcover}) and soil evaporation (Allen and Pereira, 2009; Fandiño et al., 2012). In the 'Vinhos Verdes' region, ground cover vegetation (GCV) persists throughout the entire season, with variations in height and density during the growing season, leading to variations in the cover crop coefficient (K_{cb gcover}) (Afonso et al., 2003; Silva et al., 2021). Active ground cover requires water but is sustainable if the many ecosystem services provided by the cover crops in the vineyards are taken into account (García et al., 2018).

In order to accurately include all indicators involved in the growing

process and obtain the soil water balance, numerous studies have used models such as the SIMDualKc model (Rosa et al., 2012b; Pereira et al., 2020a), SALTMED model (Ragab, 2002; El-Sadek, 2014) and AquaCrop model (González Perea et al., 2018; Er-Raki et al., 2021). These software programs were considered accurate and precise in their inclusion of multifactorial factors, including all variables related to the soil, plant, climate, irrigation and soil cover. The SimDualKc model incorporates information on the soil, climate, crops and cover crops both within and between vine rows. The model outputs several variables that can be used to derive indicators, including the total growing season water use, actual crop evapotranspiration and total transpiration (Rosa et al., 2012b; Pereira et al., 2020a), allowing the accurate calculation of the water productivity (WP) and crop water use efficiency (WUE_c).

The aim of this study is to give an insight into the water productivity of *Vitis vinifera* cv. Alvarinho, trained in a vertical shoot system with a low density, in Northwestern Portugal. To achieve this, the study implements the dual Kc approach using the SIMDualKc model, applying this approach to different irrigation strategies, to verify an increase in water productivity and water use efficiency in cv. Alvarinho. The purpose of this research is to support irrigation management programs that improve the water use efficiency in agriculture, with a specific emphasis on vineyards.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study was carried out over two growing seasons (2018 and 2019) in a commercial cv. Alvarinho vineyard located in Monção, Northwestern Portugal (42°04'39.3"N 8°21'31.0"W and 175 m.a.s.l.). The vineyard, which totalled 1.9 ha, was planted in 2009 with row spacing of 3.0 m and vine spacing of 3.0 m (1111 plants ha⁻¹). It was trained in a north-south orientation, with a 31.5° slope to the west, using a vertical shoot system (Fig. C.1). The irrigation system utilized drip irrigation, with a surface drip line in vineyard rows at 0.40 m above the soil and pressure-compensated emitters (4 L h⁻¹) at intervals of 1 m (Fig. D.1). In May 2018, a field experiment was conducted to evaluate the irrigation performance, obtaining distribution uniformity (DU) of 91 % (Merriam and Keller, 1978). For the detailed definitions of all parameters, please refer to Appendix A.

2.1.1. Climate and meteorological description

The climate of the study area was classified as Atlantic, with relatively mild summers and annual rainfall above 1200 mm (Fraga et al., 2014). The Köppen-Geiger classification for the area was Csb (Kottke et al., 2006).

The weather station located in the field (UNL Ameriflux Site, Mead NE) collected daily meteorological data, including the temperature (°C), humidity (%), wind speed at 2 m height (m s⁻¹), shortwave radiation (MJ m⁻² d⁻¹) and precipitation (mm). The reference evapotranspiration (ET_o) was calculated using the FAO Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998) (Eq. (2)). Throughout the growing season, in 2018, the ET_o ranged between 1.1 (DOY 96) and 8.1 (DOY169) mm day⁻¹; in 2019, it ranged between 1.5 (DOY94) and 7.0 (DOY151) mm day⁻¹ (Fig. 1). The daily variability was high, depending on factors such as the net radiation, temperature and wind speed.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1-0.34U_2)} \quad (2)$$

where Δ represents the slope of the saturation vapor pressure-temperature relationship at the mean air temperature (kPa °C⁻¹), R_n is the net radiation at the crop surface (MJ m⁻² d⁻¹), G is the soil heat flux density (MJ m⁻² d⁻¹), γ is the psychrometric constant (kPa °C⁻¹), T is the mean daily air temperature (°C), U₂ is the wind speed (m s⁻¹) at 2 m height and (e_s - e_a) represents the vapor pressure at 2 m (kPa) (e_s is

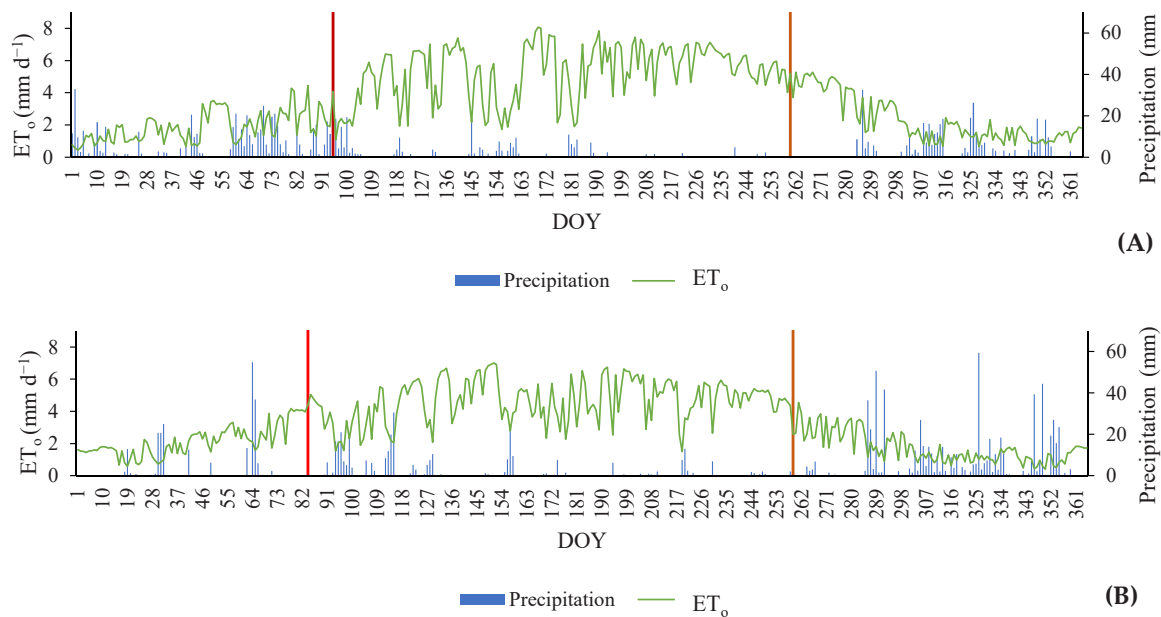


Fig. 1. Precipitation (mm) and reference evapotranspiration (ET_0 , mm d^{-1}) for 2018 (A) and 2019 (B). The vertical bars represent the beginning (|) and end (|) of the growing season.

saturated and e_a is the actual vapor pressure).

In 2018 and 2019, the total rainfall was 1126 and 1231 mm, respectively. The growing season lasted from DOY95 to DOY260 in 2018 and from DOY84 to DOY259 in 2019. Within the growing season, the rainfall amount was 228 mm and 332 mm for 2018 and 2019, respectively (Fig. 1). The average temperature in 2018 was 19.1 °C, while, in 2019, it was 18.4 °C.

2.1.2. Soil and active ground cover characterization

The soil texture was sandy loam, composed of 67.2 % sand, 16.4 % silt and 16.4 % clay, with 1.74 % organic matter. The total available water (TAW) was calculated using Eq. (3) and was in agreement with that reported for other similar soil and cultivars (Cancela et al., 2016; Silva et al., 2021). The TAW result was 112.8 mm considering a depth root (Z_r) of 0.8 m, similar to that stated by Silva et al. (2021) for grapevines. Nine undisturbed soil samples of 100 cm^3 were collected from three sites at depths of 0–20 cm, 20–50 cm and 50–80 cm, to determine the soil water retention characteristics. In the laboratory, the field capacity was determined by using a pressure plate to apply suction of -33 kPa to the saturated soil samples. The wilting point was obtained using the same samples, with suction of -1500 kPa (Evelt et al., 2019). The average field capacity (FC) of the samples was $0.281 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, and the average wilting point (WP) was $0.140 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, up to a depth of 0.8 m.

$$\text{TAW} = 1000 * Z_r(\text{FC} - \text{WP}) \quad (3)$$

where Z_r is the depth root, FC is the field capacity and WP is the wilting point.

The active ground cover, consisting of spontaneous species with most plants belonging to the Poaceae family, was photographed during the growing season with a digital camera (Canon EOS 77D, JP) and subsequently characterized in terms of height and density. Eight observations in 2018 and thirteen observations in 2019 were used to characterize the cover crop at different growth stages (Appendix B). The density of the vegetation varied over time due to mowing, ranging from 50 % to 95 % within rows and 10–90 % between rows. The height of the ground cover crop also varied, measuring between 0.05 m and 0.2 m within rows and 0.03 m and 0.18 m between them.

2.2. Experimental design

Two irrigation strategies and a control were implemented in the study. The full irrigation (FI) treatment represented the irrigation applied by the vinegrower, which was dependent on the water availability and the vinegrower's experience. The deficit irrigation (DI) treatment was designed to provide half the volume of the FI treatment. The control treatment was rainfed (R), the most common method practiced in the region. Each treatment comprised two replicates with four vineyard rows each. Access probes were installed in the two central rows, while the other two rows served as buffers (Fig. D.1). To ensure a homogeneous test area, the apparent electrical conductivity of the soil (EC_a) was assessed (Mirás-Avalos et al., 2020). Data were collected on 5 April 2018 at 1419 points using an EM38 instrument (Geonics Ltd., CA), a field computer and a GPS RTK for georeferencing. The EM38 instrument's transmitter–receiver coils were oriented parallel to the Earth in vertical dipole, an effective mode for deeper investigation (1.50 m) (Nadler, 1982). The EC_a , calculated with the actual soil temperature, was adjusted to 25 °C using the soil temperature measured every 5 minutes at a depth of 0.25 m with four temperature probes (Fig. C.1).

The available soil water content (ASW, mm) data were obtained by converting the soil moisture values obtained with a capacitive probe, previously calibrated following the instructions provided in the manufacturer's manual (Diviner 2000, Sentek, AU). Twenty-four access probe tubes were installed only in the rows, because this was the location where the vineyard extracted the majority of the water (Fandiño et al., 2012; Pagay, 2022), at eight soil depths every 10 cm and up to 80 cm (Silva et al., 2021), distributed across the treatments (eight access probe tubes per treatment). The access probes were installed one meter from the plant and between two emitters (Fig. D.1). Irrigation was started in both years after the volumetric soil moisture content had reached 70 % of the field capacity. In the 2018 season, irrigation was carried out between DOY 211 and DOY 243. Nine irrigation events resulted in 103 mm for the FI treatment and 58 mm for the DI treatment. In 2019, irrigation was carried out between DOY 211 and DOY 243. The FI treatment received 75 mm of water through seven irrigation events, while the DI treatment received 40 mm of water through the same number of irrigation events.

Phenological developments were assessed using the Baggiolini scale

(Baggiolini et al., 1993), which was later adapted to our FAO standard crop growth stages (Allen et al., 1998) (Table 1). The crop heights (h) and the fraction of soil shaded by the crop (f_c) were visually observed at solar noon and monitored during the entire growing season. The dates of the crop growth stages are presented in Table 1.

2.3. Model calibration and validation

The DualKc approach employs a set of equations, presented in Table 2. The SIMDualKc model was used to calculate the evapotranspiration (ET_c) using the dual crop coefficient approach (Allen et al., 1998) with a daily time step through equation (4). In this approach, the capillary rise (CR) and deep percolation (DP) were calculated using the parametric equations described by Liu et al. (2006) and employing a curve number of 60 to calculate the surface runoff (Rosa et al., 2012a, b).

The model calculates the $ET_{c\ act}$ (Eq. (1)) based on the soil water available within the root zone, using a water stress coefficient (K_s , 0–1). K_s is calculated daily as a linear function of the depletion of the available water in the effective root zone, as shown in equations (5) and (6). The amount of energy available at the soil surface, in combination with the energy consumed for crop transpiration, limits the evaporation from the soil surface (Allen et al., 1998).

The model computes the soil evaporation coefficient (K_e) using the daily water balance of the soil layer via equation (7). To calculate K_e , it is necessary to determine the exposed and wetted soil fraction (f_{ew}) (equation (8)) and the soil evaporation reduction coefficient (K_r). K_r is calculated using the two-stage drying cycle approach (Allen et al., 1998), where the first stage (9) is the energy-limiting stage and the second is the water-limited stage or falling rate stage (10). Furthermore, the initial values of the basal crop coefficients ($K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ and $K_{cb\ end}$) were derived from the observed ground cover fraction (f_c) and plant height values (Table 1) using equation (11) proposed by Allen and Pereira (2009). The density coefficient (K_d), $K_{cb\ full}$ and stomatal adjustment (F_r) were estimated using equations (12), (13) and (14), respectively (Allen and Pereira, 2009).

Then, the calibration of the model was required (Fandiño et al., 2012; Rosa et al., 2012a; Paredes et al., 2018; Darouich et al., 2023), which involved adjusting the following crop parameters: the initial basal crop coefficient ($K_{cb\ full\ ini}$), the midseason basal crop coefficient ($K_{cb\ full\ mid}$), the end basal crop coefficient ($K_{cb\ full\ end}$), and the p depletion fractions. $K_{cb\ full}$ was used to determine the basal K_{cb} expected for vegetation under full cover conditions, as verified in our study vineyard.

The soil evaporation parameters, including the evaporable layer depth ($Z_e = 0.10$ m), total evaporable water (TEW) and readily evaporable water (REW), were obtained through the soil characteristics under the local conditions of cv. Alvarinho. The total evaporable water (TEW) used was 21 mm, while the readily evaporable water (REW) used was 9 mm and the depth of the soil evaporation layer (Z_e) was 0.1 m.

The F_r values used in this work for the crop were 0.21, 0.46 and 0.20 for the early, mid- and end seasons, respectively, with an ML of 1.5. A

Table 1

The vineyard crop growth stage, height (h) and fraction of the soil covered by the crop in the vineyard (f_c) on respective days of the year (DOY).

| Crop Growth Stage (Allen et al. 1998) | Baggiolini scale (Baggiolini et al. 1993) | DOY in 2018 | DOY in 2019 | h (m) | f_c |
|---------------------------------------|---|-------------|-------------|-------|-------|
| Initiation | C (green-tip bud burst) | 95 | 84 | 0.6 | 0.01 |
| Start of rapid growth | D (leaf emergence) | 110 | 106 | 0.8 | 0.05 |
| Start of midseason | I (flowering) | 150 | 147 | 1.5 | 0.10 |
| Start of maturity | M (veraison) | 214 | 206 | 1.8 | 0.20 |
| Harvesting | N (maturity) | 260 | 259 | 1.8 | 0.20 |

ground cover F_r value of 0.25 was used in this work. Information about variations in the density and height of the cover crop in the rows and inter-row areas (Appendix B) was included in the software to ensure that the model accounted for the water used by the cover crop.

Equations 4–10 were defined by Allen et al. (1998) and equations 11–14 were defined by Allen and Pereira (2009).

For calibration, the differences between the observed and simulated ASW values were minimized in the R treatment for 2018. The other treatments (2018-DI, 2018FI, 2019-R, 2019-DI and 2019-FI) were used for validation purposes. Treatment R 2018 was selected for calibration due to its a broad range of ASW and the absence of irrigation events, which could potentially introduce bias. The calibration process began with the reference $K_{cb\ full}$, F_r , p and ML parameters, and subsequent adjustments were made.

The methodology used to assess the model's accuracy was similar to that used in earlier studies (Silva et al., 2021). Linear regression was performed by comparing the observed and simulated ASW values, with the regression forced to the origin (Pereira et al., 2020b). A set of goodness-of-fit indicators was used to evaluate the model's performance during calibration and to assess the validation results. The indicators included the regression coefficient (b), determination coefficient (r^2), root mean square error (RMSE, mm) (see Eq. (15)), normalized RMSE (NRMSE, %) (see Eq. (16)), average relative error, percent bias of estimation (PBIAS, %) (see Eq. (17)), average absolute error (AAE, mm) (see Eq. (18)) and index of agreement (dIA, dimensionless) (see Eq. (19)) between the observed and model-predicted values, respectively (O_i and P_i ($i = 1, 2, \dots, n$)).

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (15)$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

$$EF = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (17)$$

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (18)$$

$$dIA = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (19)$$

The calibration of the $K_{cb\ full}$, p, F_r and ML parameters involved analysing and improving the regression coefficient (b) and determination coefficient (r^2) parameters between the observed and simulated ASW, aligning them closer to 1. The b and r^2 indicators are two related but different correlation measures. In this case, a higher r^2 value indicates a stronger correlation between the obtained and simulated values, even if they are not identical. Conversely, b is a performance indicator, with a value closer to 1 indicating lower volatility between the observed and simulated values.

Then, the RMSE was used to measure the average difference between the predicted values from the model and the observed ones. The PBIAS was used to assess the average tendency of the simulated values to be higher or lower than the observed values. The AAE represents the mean absolute error between the simulated and observed values. The aim of calibration/validation was to minimize these indicators (RMSE, PBIAS and AAE) and bring them closer to zero, in line with Rosa et al. (2012a). The aim was to achieve values close to 1 for the EF and dIA indicators. This is because an EF close to 1 indicates a direct relationship between the real and simulated values, while a dIA value close to 1 indicates a balanced ratio between the mean squared error and the potential error.

Table 2

The equations used to perform the DualKc approach.

| Equation | Terms |
|--|---|
| $D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{e,i} + DP_i$ | (4) $D_{r,i}$ and $D_{r,i-1}$ represent the root zone depletion, in mm, at the end of day i and $i - 1$, respectively; P_i is the precipitation; RO_i is the runoff; I_i represents the net irrigation depth; CR_i is the capillary rise from the groundwater table; $ET_{e,i}$ is the crop evapotranspiration; and DP_i is deep percolation, referring to the end of day (i) or the end of the previous day ($i - 1$), and all are expressed in mm. |
| $K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \rightarrow \text{for } D_r > RAW, (RAW = p * TAW)$ | (5) TAW and RAW are, respectively, the total and readily available soil water (mm) relative to the root zone depth (Z_r); p is the soil water depletion fraction for no stress. |
| $K_s = 1 \rightarrow \text{for } D_r \leq RAW$ | (6) |
| $K_e = K_r(K_{cmax} - K_{cb}) \rightarrow \text{with } K_e \leq f_{ew}K_{cmax}$ | (7) K_{cmax} is the maximum value of K_c following a wetting event by rain or irrigation, generally 1.20, and f_{ew} is the fraction of the soil that is both exposed to radiation and wetted by rain or irrigation, i.e., the fraction of the soil surface from which most evaporation occurs. |
| $f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w)$ | (8) f_c represents the fraction of the ground covered by the crop and f_w is the fraction of soil wetted by irrigation. |
| $K_r = 1 \rightarrow \text{for } D_{e,i-1} \leq REW$ | (9) $D_{e,i-1}$ is the cumulative depth of evaporation (depletion) from the soil surface layer at the end of day $i - 1$. TEW represents the maximum cumulative depth of evaporation (depletion) from the soil surface layer and REW is the readily evaporable water. |
| $K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \rightarrow \text{for } D_{e,i-1} > REW$ | (10) |
| $K_{cb} = K_{cmin} + K_d(K_{cb full} - K_{cmin}), K_{cmin}=0.15$ | (11) K_{cmin} is the minimum basal K_c for bare soil, with $K_{cmin} = 0.15$ in typical agricultural conditions and for native vegetation when the frequency of rainfall is high; K_d represents the density coefficient; $K_{cb full}$ is the K_{cb} estimated during peak plant growth for conditions with almost total soil cover (or LAI > 3). |
| $K_d = \min\left(1, M_L f_{c eff} \frac{f_c}{f_{c eff}}\right)$ | (12) $f_{c eff}$ is the effective fraction of ground covered or shaded by vegetation [0.01–1] at solar noon; M_L is a multiplier of $f_{c eff}$ describing the effect of the canopy density on the shading and on the maximum relative evapotranspiration per fraction of shaded ground [1.5–2.0]. |
| $K_{cb full} = F_r \left(\min(1.0 + k_h h, 1.20) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \right)$ | (13) F_r represents the resistance correction factor; the sum $(1 + k_h h)$ represents the effect of the crop height; u_2 is the average daily wind speed ($m s^{-1}$) at a height of 2 m above ground level; RH_{min} (%) is the average daily minimum relative humidity during the growth period; and h is the mean plant height (m) during the mid-season. |
| $F_r = \frac{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2 \frac{r_1}{r_{typ}})}$ | (14) Δ is the slope of the saturation vapor pressure vs. air temperature curve, $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$; γ is the psychrometric constant, $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$; u_2 is the average daily wind speed ($m s^{-1}$) at a height of 2 m above ground level; and r_1 and r_{typ} are, respectively, the mean leaf resistance and the typical leaf resistance ($s m^{-1}$) for the vegetation in question. The original version of this equation was established with a fixed $r_{typ} = 100 s m^{-1}$, a common value for annual crops, but the default F_r values were recently reviewed for trees and vines and several annual crops (Pereira et al. 2021b). |

After calibration, it was confirmed that the simulated values obtained through the SIMDualKc model were similar to the average values of the available soil water (ASW) obtained with the capacitive probes. The validation process utilized previously calibrated parameters from other treatments during 2018 and 2019.

Obtaining good calibration and respective validation was crucial to support the accuracy of the model in performing the ASW evaluation. In the present study, this was also important because other variables provided by the model were used, such as the transpiration crop plus ground cover ($T, m^3 ha^{-1}$), actual crop evapotranspiration ($ET_{c act}, m^3 ha^{-1}$), total water used (TWU, mm), actual basal crop coefficient ($K_{cb(gcover + crop) act}$), soil evaporation coefficient (K_e), water stress coefficient (K_s) and ground cover basal crop coefficient ($K_{cb gcover}$) during the growing season for all treatments in both years. The TWU is achieved by combining the results of irrigation, precipitation and the water removed from the soil during the growing season. The amount of water extracted from the soil is calculated by subtracting the initial soil moisture content from the final value obtained through the model.

2.4. Water productivity and water use efficiency

To determine the effects of deficit irrigation strategies, several water indices (WP and WUE_c) were determined, whose requirements included the yield and biomass production. Therefore, harvesting and pruning were carried out on the same plants, resulting in four groups of seven plants (28 plants) for each treatment (DI and FI) and in the control (R), totalling 84 plants. Each plant was harvested individually to determine the production of the plant, which was later converted into a yield ($kg ha^{-1}$). The same set of plants was selected for pruning and the weight of the wood was measured individually to obtain the pruning wood indicator ($kg ha^{-1}$).

The water productivity in viticulture, WP ($kg m^{-3}$), was defined as

the ratio between the vineyard fruit yield, FY ($kg ha^{-1}$), and the total water use, TWU ($m^3 ha^{-1}$), as shown in Eq. (20). Recognizing the significant water usage associated with grapevine vegetative growth, two new indices were introduced by Cancela et al. (2016) to incorporate the pruning wood and the fruit yield plus the pruning weight (Eqs. (21) and (22)). Another way to demonstrate the water productivity is to compare the fruit yield with the transpiration (T) (Eq. (23)) or actual crop evapotranspiration ($ET_{c act}$) (Eq. (24)) during the growing season (Pereira et al., 2020). Finally, the crop water use efficiency (WUE_c) was estimated by applying the concept defined by Fernández (2023), using Eq. (25).

$$WP_{FY} = \frac{FY}{TWU} \quad (20)$$

$$WP_{PW} = \frac{PW}{TWU} \quad (21)$$

$$WP_{FY+PW} = \frac{FY + PW}{TWU} \quad (22)$$

$$WP_T = \frac{FY}{T} \quad (23)$$

$$WP_{ETc} = \frac{FY}{ET_{c act}} \quad (24)$$

$$WUE_c = \frac{ET_{c act}}{I + P} \quad (25)$$

where TWU corresponds to the water used to achieve the FY ($m^3 ha^{-1}$), PW refers to the pruning wood ($kg ha^{-1}$), FY + PW is the sum of the fruit yield and pruning wood ($kg ha^{-1}$), T corresponds to transpiration (crop plus ground cover, $m^3 ha^{-1}$), $ET_{c act}$ is the actual crop

evapotranspiration ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), I is the irrigation applied and P is the total precipitation during the season.

For the FY parameter, the production of 28 vines was considered in each treatment (84 vines per year). In this study, the PW was determined by individually weighing the pruning firewood from the same vines.

The TWU parameter was calculated considering the water used during the growing season, including both precipitation and irrigation, as proposed by other authors (Cancela et al., 2016; Gonzalez-Fernandez et al., 2020; Ma et al., 2023). The calculation also took into account the variation, represented as the difference in the ASW between the initiation and harvest stages (ΔASW), as shown in Eq. (26).

$$\Delta\text{ASW} = \text{ASW}_{\text{initial}} - \text{ASW}_{\text{harvest}} \quad (26)$$

where $\text{ASW}_{\text{initial}}$ and $\text{ASW}_{\text{harvest}}$ represent the available soil water at the initial and harvest stages, respectively.

2.5. Quality assurance, quality control and statistical analysis

To ensure quality assurance and quality control, the climate data were reviewed to minimize errors and biases in the system (Allen et al., 2011). To evaluate the data integrity, we followed the methodology proposed by Allen (1996) and then calculated the ET_0 (Allen et al., 1998). The data were analysed and improved to reduce errors. Data from a meteorological station located 35 km away were used to replace atypical or missing data due to technical problems. This weather station was complementary because of its proximity. Precipitation values of approximately 0.01 mm, which were due to condensation, were eliminated. To analyse the variability in the treatment means and post hoc comparisons, a one-way ANOVA procedure in SPSS 27 was used. The post hoc tests used Duncan's method with a significance level of $p < 0.05$.

3. Results

The standard and calibrated crop parameters, $K_{\text{cb full ini}}$, $K_{\text{cb full mid}}$, $K_{\text{cb full end}}$ and p , are shown in Table 3 (Allen et al., 1998; Allen and Pereira, 2009). The values for $K_{\text{cb full mid}}$ and $K_{\text{cb full end}}$ were slightly lower than those suggested by the standard. Furthermore, there was a slightly higher mean p -value compared to the standard.

The ASW results observed and simulated in R 2018 are presented in

Table 3
The standard and calibrated model parameters for cv. Alvarinho.

| Parameter | Standard | Calibrated |
|--|-----------|------------|
| $K_{\text{cb full ini}}$ (dimensionless) | 0.20 | 0.22 |
| $K_{\text{cb full mid}}$ (dimensionless) | 0.80 | 0.53 |
| $K_{\text{cb full end}}$ (dimensionless) | 0.60 | 0.24 |
| p_{ini} (dimensionless) | 0.45 | 0.50 |
| p_{mid} (dimensionless) | 0.45 | 0.55 |
| p_{end} (dimensionless) | 0.45 | 0.60 |
| Fr_{ini} | 0.20–0.70 | 0.21 |
| Fr_{mid} | 0.65–0.70 | 0.46 |
| Fr_{end} | 0.50–0.53 | 0.20 |
| ML | 1.50 | 1.50 |
| Capillary rise | | |
| a1 | 320.8 | 281 |
| b1 | −0.16 | −0.16 |
| a2 | 303.2 | 231.55 |
| b2 | −0.54 | −0.54 |
| a3 | −0.15 | −0.15 |
| b3 | 2.1 | 2.1 |
| a4 | 7.55 | 7.55 |
| b4 | −2.03 | −2.03 |
| Deep percolation | | |
| a _p | 390 | 400 |
| b _p | −0.0173 | −0.0173 |

Standard (Allen et al., 1998; Allen and Pereira, 2009; Pereira et al., 2020b) K_{cb} = basal crop coefficients, p = depletion fraction, Fr = stomatal adjustment, ML = canopy transparency. Standard parameters for capillary rise and deep percolation were obtained according to Liu et al. (2006) Liu et al. (2006)

Fig. 2. The initial RAW value was 56.4 mm, which progressively decreased to 50.8 mm as the crop approached the mid-season. The value remained stable until the beginning of maturation, after which it decreased again to 45.1 mm at the final stage. A high level of agreement was found between the observed and simulated ASW values in all treatments, particularly in treatments without irrigation (R). Nevertheless, at certain points, there was a tendency towards overestimation and underestimation. The treatment described as FI-2018 (Fig. 2 A.3) exemplified a case of model overestimation starting from DOY 211, where a deviation between the observed and simulated values occurred. In 2019, the model overestimated the ASW of all treatments on DOY 199 (Fig. 2 B). A greater quantity of water was extracted from the soil in 2018 than in 2019 (Fig. 2). In the 2018 growing season, 192, 171 and 133 mm of soil water was removed from the soil in treatments R, DI and FI, respectively. In the 2019 growing season, 73, 36 and 6 mm of soil water was removed from the soil in treatments R, DI and FI, respectively.

The results of the goodness-of-fit indicators used to evaluate the model fit during calibration and to assess the validation results are presented in Table 4. The underlined values in the table represent the calibration performed for the R-2018 treatment. The regression and determination coefficients (b and r^2) resulting from a forced regression to the origin are presented, along with the values of the indicators EF (Eq. 17), RMSE (Eq. 15), NRMSE (%), PBIAS (Eq. 16), dIA (Eq. 19) and AAE (Eq. 18). The calibration process (R-2018) provided the best values for the regression coefficient and the determination coefficient of 0.988 and 0.995, respectively.

The regression coefficient approached 1.0 (ranging from 0.952 to 1.044), indicating statistical similarity between the predicted and observed values for all treatments and crop seasons. The r^2 values ranged from 0.928 to 0.995, indicating that the model accounted for most of the total variance in the observed values. The low RMSE values, ranging from 4.320 to 5.384 mm, indicate that the estimation errors were small. These values, in conjunction with the low NRMSE (ranging from 4.764 % to 6.684 %), indicate low residual errors. The AAE values were also rather low, ranging between 3.835 mm and 4.800 mm, corresponding to values lower than 4.255 % of the TAW. The PBIAS was very low, suggesting an underestimation bias in the FI-2018 treatment (PBIAS = 5.386) and an overestimation bias (PBIAS = −4.503) in the DI-2019 treatment.

Differences were observed in all indicators used between the R-2018 treatment (calibration) and the validation treatments. The R-2018 values were found to be the most accurate, while the FI-2019 values were the least accurate. However, even in FI-2019, a b of 1.044 and an r^2 of 0.963 were observed, which are close to 1, indicating a high level of agreement between the observed and simulated ASW. Therefore, the model did not exhibit a trend of under- or overestimation bias, showing a slight underestimation in 2018 and a slight overestimation in 2019.

Variations in the different coefficients, namely K_e , $K_{\text{cb full}}$ and $K_{\text{c act}}$, were observed among the irrigation treatments (Fig. 3). Furthermore, the stress levels (K_s) for each treatment in both seasons are presented, with lower values observed in the R and DI treatments (Fig. 3). The values for the $K_{\text{cb (gcover + crop) act}}$ are presented in Table 5.

During the 2018 growing season, the active ground cover density in the rows varied between 50 % and 95 %, with the height varying between 0.05 and 0.18 m. In addition, the active cover density varied between 60 % and 90 % with a height within rows of between 0.05 m and 0.15 m (Fig. 4). In 2019, the density of the active ground cover in the rows ranged from 60 % to 90 %, with heights ranging from 0.06 m to 0.20 m (Fig. 4). Between the rows, the density ranged from 10–90 %, and the height ranged from 0.03 m to 0.18 m. Variations in height and density occurred in both years, mainly as a result of agronomic practices (phytosanitary treatments and vegetation cutting).

This variation was more intense in 2019 because, on DOY 146, a high level of vegetation cutting was carried out between the rows. The effect of the ground cover was different during the two growing seasons: the $K_{\text{cb gcover}}$ (simulated by SIMDualKc) in 2019 (ranging between 0.281 and

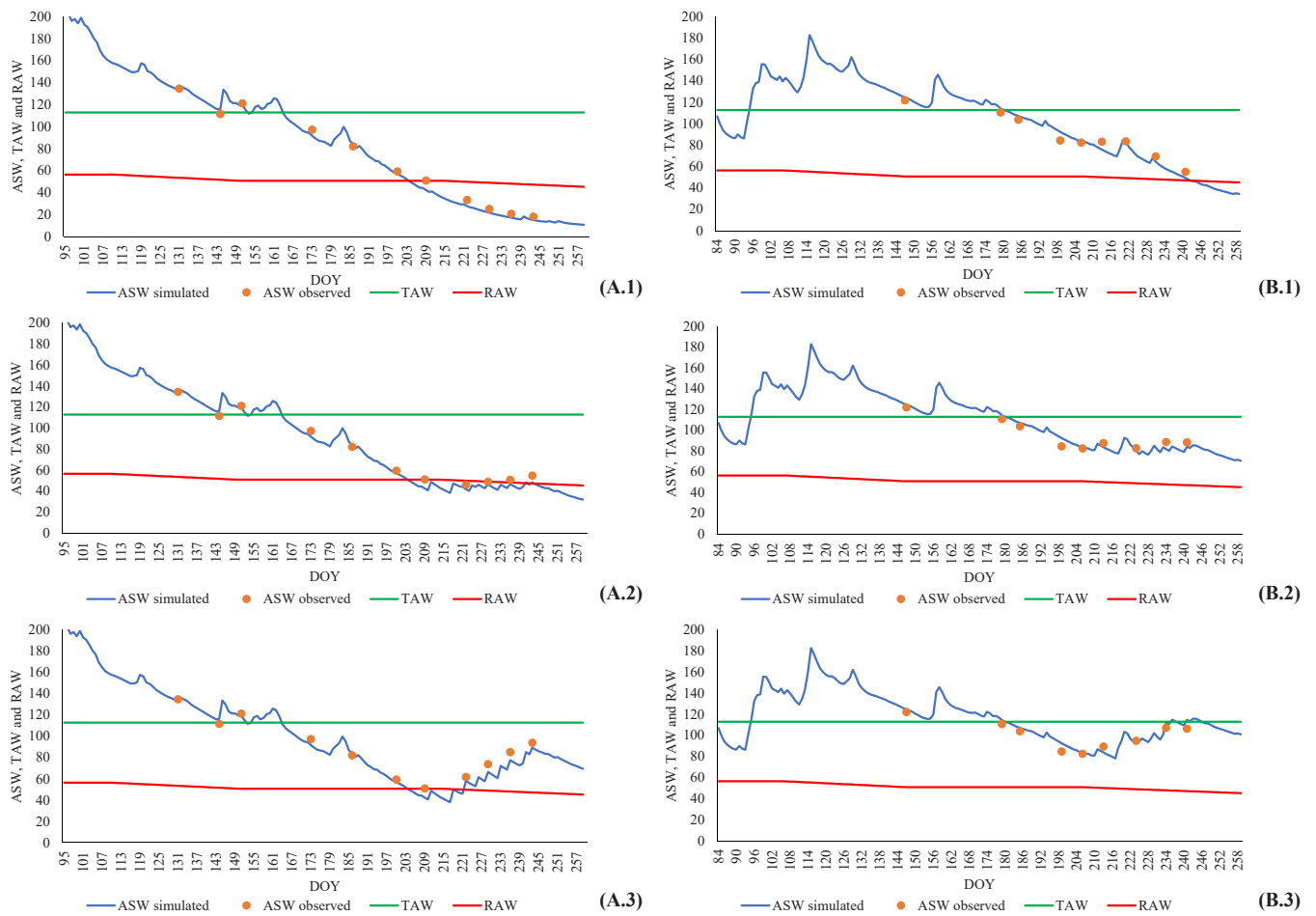


Fig. 2. Simulated (—) vs. observed (●) average available soil water content (ASW) at 0.80-meter depth relative to (A) 2018 and (B) 2019. (1) Rainfed (R), (2) deficit irrigation (DI), (3) full irrigation (FI). TAW (—) and RAW (—) represent the total available and readily available soil water in the root zone, respectively. All values are expressed in mm.

Table 4

Goodness-of-fit indicators relative to the SIMDualKc model’s calibration and validation for the different treatments in the 2018 and 2019 growing seasons.

| | Year | 2018 | | | 2019 | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | Treatment | R | DI | FI | R | DI | FI |
| Linear regression | b | | 0.988 | 0.983 | 0.952 | 1.007 | 1.003 | 1.044 |
| | r ² | | 0.995 | 0.993 | 0.980 | 0.971 | 0.928 | 0.963 |
| Goodness-of-fit indicators | EF | | 0.989 | 0.979 | 0.932 | 0.938 | 0.887 | 0.839 |
| | RMSE (mm) | | 4.320 | 4.557 | 5.384 | 4.845 | 4.500 | 5.267 |
| | NRMSE (%) | | 6.302 | 5.848 | 6.684 | 5.488 | 4.764 | 5.148 |
| | PBIAS (%) | | 3.377 | 3.233 | 5.386 | 0.025 | -0.101 | -4.503 |
| | d _{IA} | | 0.997 | 0.995 | 0.984 | 0.987 | 0.989 | 0.961 |
| | AAE (mm) | | 3.835 | 4.040 | 4.800 | 4.144 | 4.026 | 4.607 |

R: rainfed; DI: deficit irrigation; FI: full irrigation; b: regression coefficient, r²: determination coefficient, EF: modelling efficiency; RMSE: root mean square error; NRMSE (%): normalized RMSE of total available water; PBIAS (%): percent bias of estimation; d_{IA}: index of agreement; AAE: average absolute error (mm). The underlined data refer to the calibration results.

0.167) was greater than that in 2018 (ranging between 0.215 and 0.201). The most extreme values were reached in 2019.

During the 2018 and 2019 growth seasons, differences were observed in K_{cb} (gover + crop) act and K_e when comparing the same treatments (Table 5, Fig. 3). The maximum values for K_{cb} (gover + crop) act were obtained in the FI treatment. The DI treatment obtained the same values for K_{cb} (gover + crop) act as the FI treatment, with the exception of the end of the 2018 season, when the value was 0.03 lower. Treatment R had lower values than the other treatments in both years at the end of the season. The average K_e values were similar between the treatments and phenological states.

Regarding the crop and ground cover transpiration, differences were observed between the treatments at the end of the growing season (Fig. 5). This was likely due to the lower water availability during this growing season. In 2018, the values of this transpiration were lower in treatment R compared to the other treatments (Fig. 5 A). In 2019, the transpiration in treatment R was similar to that in the other treatments, with lower levels during the end of the season, due to the high precipitation that occurred during the 2019 season (Fig. 5 B).

A summary of all the crop water productivity parameters for both vineyards is presented in Table 6. The fruit yield and pruning wood values varied more between years than between treatments, verifying

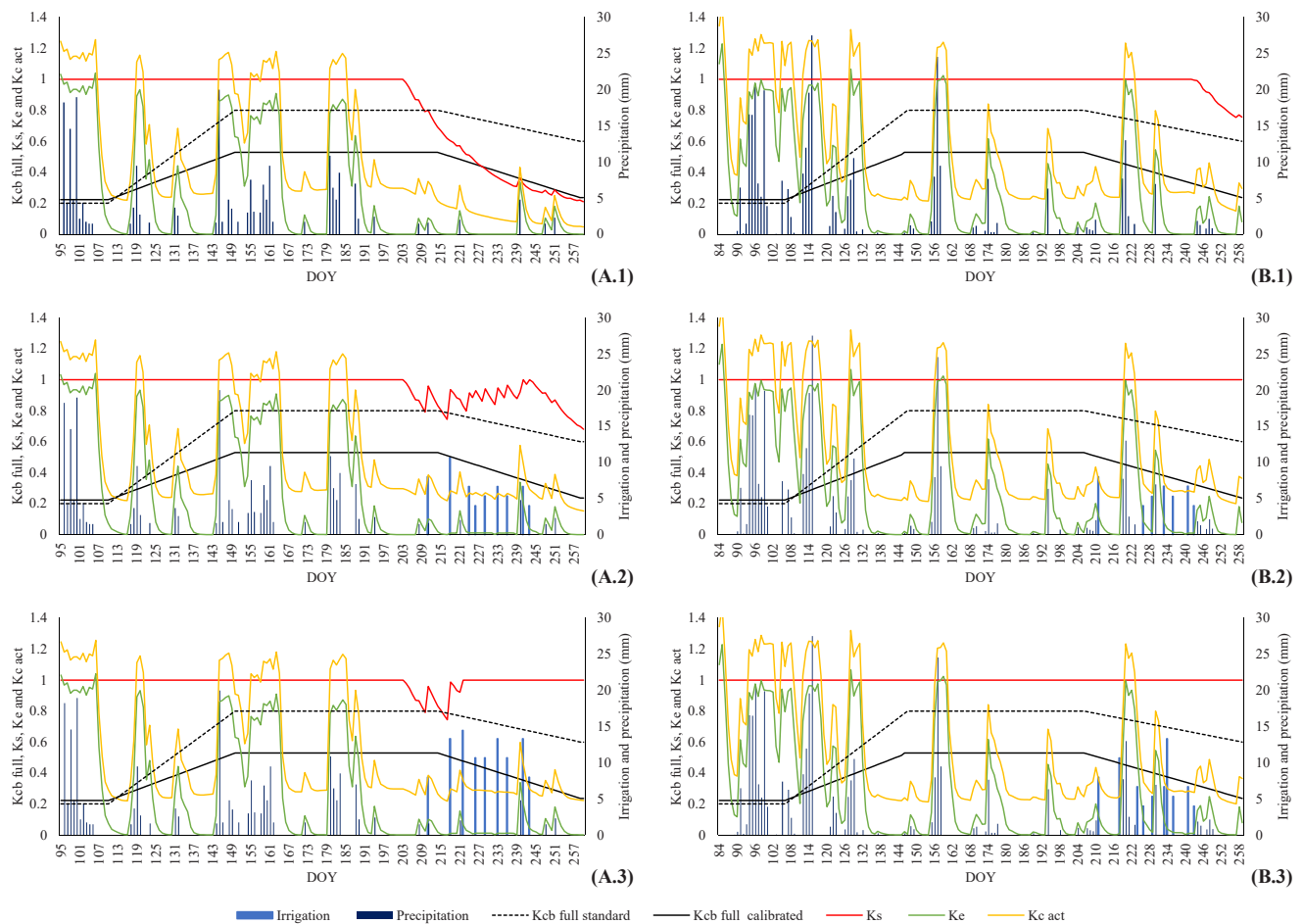


Fig. 3. Irrigation (■), precipitation (■), $K_{cb\ full\ standard}$ (-----), $K_{cb\ full\ calibrated}$ (—), K_s (—), K_e (—) and $K_{c\ act}$ (—) relative to (A) 2018 and (B) 2019. (1) Rainfed (R), (2), deficit irrigation (DI), (3) full irrigation (FI).

Table 5
Average values of crop coefficients and precipitation (mm) for different crop growth stages.

| Crop Growth Stage | 2018 | | | | | | | |
|-------------------|---------|-------------------------------|------|------|-------|------|------|------------|
| | DOY | $K_{cb\ (gover + crop)\ act}$ | | | K_e | | | Prec. (mm) |
| | | R | DI | FI | R | DI | FI | |
| Initial | 95–110 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 72 |
| Rapid growth | 110–150 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 57 |
| Mid-season | 150–214 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 88 |
| End of season | 214–260 | 0.10 | 0.23 | 0.26 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 11 |
| | 2019 | | | | | | | |
| | DOY | $K_{cb\ (gover + crop)\ act}$ | | | K_e | | | Prec. (mm) |
| | | R | DI | FI | R | DI | FI | |
| Initial | 84–106 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.73 | 0.73 | 0.73 | 105 |
| Rapid growth | 106–147 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.41 | 0.41 | 0.41 | 111 |
| Mid-season | 147–206 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 66 |
| End of season | 206–259 | 0.23 | 0.24 | 0.24 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 45 |
| Average 2018–2019 | | 0.23 | 0.25 | 0.25 | 0.36 | 0.36 | 0.36 | |

$K_{cb\ (gover + crop)\ act}$ = actual basal crop coefficient, K_e = soil evaporation coefficient, Prec. = precipitation (mm). R = rainfed, DI = deficit irrigation and FI = full irrigation treatment.

that, in 2018, the production of grapes and pruning wood was 2.3 and 1.9 times higher than in 2019, respectively. After conducting the univariate analysis of variance test, it was found that there was a significant difference between the years in terms of the fruit yield and pruning wood ($p < 0.001$). Regarding the WP results, in the first year of study, there were no significant differences between the treatments, although

they were characterized by the highest yields and pruning wood levels. However, in the following year, most of the water productivity parameters showed statistically significant differences, indicating a trend towards deficit irrigation being the better treatment (Table 6). When considering the water productivity in terms of the transpiration and actual crop evapotranspiration, it was found that it was similar across all

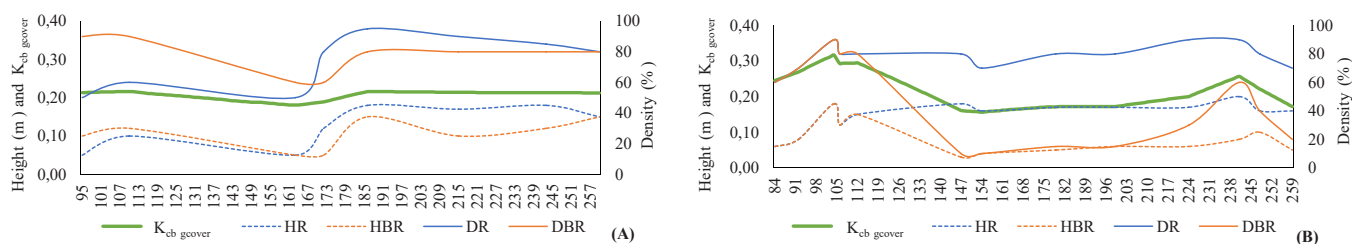


Fig. 4. Evolution of K_{cb_gover} (—) (simulated by SIMDualKc) and active ground conditions: height (HR) (---), density in row (DR) (—), height (HBR) (---) and inter-row density (DBR) (---) relative to (A) 2018 and (B) 2019.

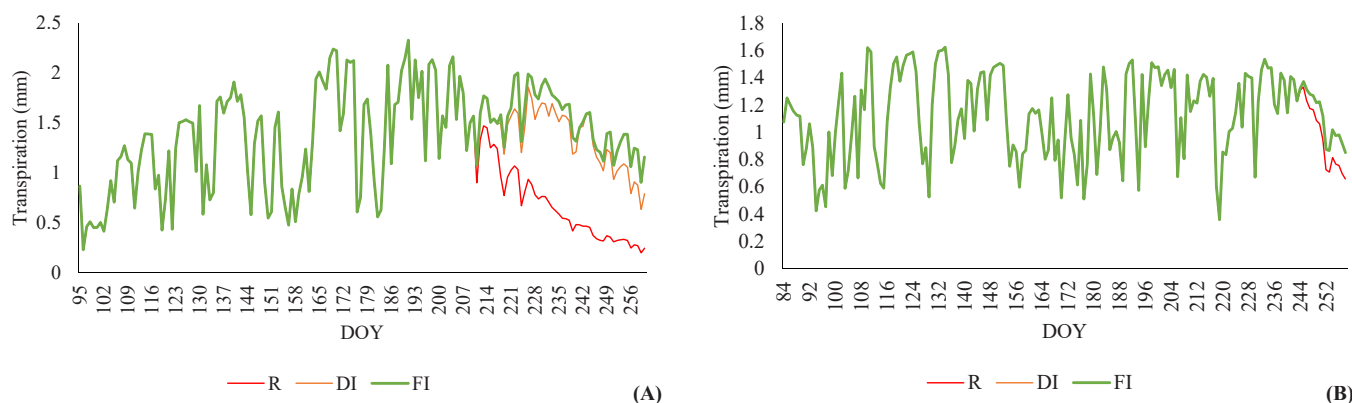


Fig. 5. Evolution of transpiration (crop plus ground cover) under R (—), DI (—) and FI (—) treatments relative to (A) 2018 and (B) 2019.

Table 6

Yield, pruning wood and water productivity indices under different irrigation treatments (R—rainfed, DI—deficit irrigation and FI—full irrigation) in 2018 and 2019.

| Year | 2018 | | | 2019 | | |
|--|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | R | DI | FI | R | DI | FI |
| Yield (kg ha^{-1}) | 9700.02 | 11,236.60 | 10,146.60 | 3455.59 ^b | 5024.74 ^a | 5206.36 ^{ab} |
| Pruning wood (kg ha^{-1}) | 3276.92 ^b | 3867.51 ^{ab} | 4202.91 ^a | 1695.39 ^b | 2290.88 ^a | 1838.71 ^{ab} |
| WP_{FY} (kg m^{-3}) | 2.31 | 2.46 | 2.18 | 0.86 ^b | 1.24 ^{ab} | 1.28 ^a |
| WP_{PW} (kg m^{-3}) | 0.78 | 0.85 | 0.91 | 0.42 ^{ab} | 0.57 ^a | 0.45 ^b |
| WP_{FY+PW} (kg m^{-3}) | 3.09 | 3.31 | 3.09 | 1.29 | 1.81 | 1.73 |
| WP_T (kg m^{-3}) | 5.23 | 5.09 | 4.45 | 1.77 ^b | 2.55 ^{ab} | 2.64 ^a |
| WP_{ETc_act} (kg m^{-3}) | 2.76 | 2.90 | 2.56 | 0.87 ^b | 1.25 ^{ab} | 1.30 ^a |
| WUE_c (-) | 0.82 | 0.78 | 0.69 | 0.61 | 0.55 | 0.51 |

WP_{FY} : water productivity fruit yield, WP_{pw} : water productivity pruning wood, WP_{FY+PW} : sum of water productivity fruit yield and pruning wood, WP_T : water productivity referring to transpiration, WP_{ETc_act} : water productivity referring to actual crop evapotranspiration, WUE_c : water use efficiency, R: rainfed, DI: deficit irrigation, FI: full irrigation, ΔASW : difference between ASW at initiation and harvest stages. For each variable, except WUE_c , lowercase letters compare different values within the year. Different letters indicate significant differences among groups with $p < 0.05$, using one-way ANOVA followed by Duncan's post hoc test.

treatments in 2018. However, significant differences were observed in 2019, where full irrigation presented the highest values, with differences compared to the control treatment but without significant differences in relation to deficit irrigation. Finally, in terms of WUE_c the highest values were obtained with the treatment with R, followed by the treatments with DI and FI in both years (Table 6).

4. Discussion

Differences in the calibrated K_{cb_full} and p values can be observed at the initial, mid- and end-season growth stages compared with the standard values (Table 3). These differences in the crop coefficients, particularly in the mid-season and at the end of the season, are attributed to factors such as the low plant density and the specific characteristics of the soil and climate for the Alvarinho cultivar, as previously reported by other authors (Kang et al., 2003). The canopy architecture and vine density, as suggested by Goodwin et al. (2006) and Ahmadi et al. (2019), can influence K_{cb_full} . The lower values of K_{cb_full} observed

in the present study may be justified by the significantly lower plant density used (1111 plant ha^{-1}) compared to other studies with cv. Loureiro (1666 plant ha^{-1}) (Silva et al., 2021), cv. Albariño (2222 plant ha^{-1}) (Fandiño et al., 2012) and cv. Tempranillo (2222 plant ha^{-1}) (López-Urrea et al., 2012). Furthermore, the lower height (h) and the fraction of soil covered by the crop in the vineyard (f_c) observed in this work, in comparison with other studies (Fandiño et al., 2012; Fandiño, 2021; Silva et al., 2021), resulting from the less vigorous plants and climatic conditions, may also have contributed to the lower K_{cb_full} .

The best fit was achieved with equal or slightly higher p depletion fractions compared with the standard values (Table 3). The highest values of the p depletion fraction suggest that *Vitis vinifera* cv. Alvarinho is more tolerant to water stress than indicated in previous studies. The lowest K_{cb_mid} value to reduce the fraction of the soil surface covered by vegetation (f_c) was 0.41 (Pereira et al., 2023). The K_{cb} values obtained for the crop in this study were 0.17, 0.23 and 0.20 at the initial, mid-season and end-season, respectively. It was verified that all values are lower than those proposed for comparable climatic conditions

(Fandiño et al., 2012; Fandiño, 2021; Silva et al., 2021). Therefore, the value obtained in mid-season is lower than the value of 0.45 proposed by Pereira et al. (2023) for 'Low (diverse trellis and trainings), 2000–3300 pl/ha', as well as that presented by Fandiño et al. (2012) (0.40) for cv. Alvarinho with 2222 plant ha⁻¹. Furthermore, it was observed that this value exceeded the proposed value of 0.20 by Pereira et al. (2023) for the category 'Very low (young <5 years, diverse trellis, and training), 2000–3300pl/ha'. In this regard, despite the vineyard being over five years old, the K_{cb} values obtained for cv. Alvarinho is situated between the proposed values for the 'Very low' and 'Low' conditions (Pereira et al., 2023). This is attributable to a markedly reduced planting density, f_c and a diminished F_r value, with comparable conditions of height crop and M_L . This emphasises the necessity of providing detailed descriptions of the training system, density (number of vines per hectare) and f_c to facilitate the assessment of results across different locations, varieties and trellis systems.

A suitable approximation between the simulated and measured ASW values can be observed from Fig. 2. The model accurately predicted the ASW values in this work, as well as in other studies with different crops, climates and soils (Rolim et al., 2007; Paço et al., 2014; Paredes et al., 2018). However, the occasional overestimation or underestimation of the average was noted, as mentioned by Rosa et al. (2012a) and Paredes et al. (2018). Furthermore, it was observed that at the initial stages of both growth seasons, the available soil water (ASW) exceeded TAW. This can be attributed to the high precipitation that occurred prior and in the initiation stages, as illustrated in Fig. 1. The precipitation results in a high-water content in the soil. An examination of the data presented in Table 3, which concerns soil drainage, elucidates the elevated ASW values. In particular, the 'a' (400 mm) and 'b' values are associated with soil saturation and drainage speed, respectively. Furthermore, the minimal occurrence of surface runoff and deep percolation following precipitation contributed to the elevated ASW levels observed in subsequent periods. The elevated initial ASW in 2018 (Fig. 2 A) can be attributed to the 530 mm of precipitation (Fig. 1) that occurred prior to the initiation stage (DOY 1–95). In the 50 days following the initiation stage (up to DOY 145), precipitation levels reached 99 mm (Fig. 1), resulting in SIMDualKc consistently simulating values that exceeded TAW. In contrast, during the 2019 growing season, at the time of the initiation stage (DOY 84), the simulated ASW value was approaching the TAW (Fig. 2 B). The 219 mm of precipitation (significantly less than that recorded in 2018) recorded up to that point, in addition to the absence of precipitation 13 days before the initiation stage (Fig. 1), provide an explanation as to why the simulated ASW value was close TAW. However, in the subsequent 90-day period (up to DOY 174), precipitation levels reached 275 mm (Fig. 1), prompting SIMDualKc to simulate an ASW that exceeded the TAW (Fig. 2 B).

The regression to the origin demonstrated close agreement between the observed and simulated data (Table 4). Other indicators, such as the EF, RMSE, NRMSE, PBIAS, dIA and AAE, indicate that the prediction model, after calibration, efficiently estimated the ASW throughout the growing season with the different irrigation strategies. All indicators suggest that the model is suitable for use in different irrigation strategies (R, DI or FI) and years (2018 or 2019), emphasizing the robustness of the model.

The lower precipitation and higher temperature in 2018 (Fig. 1) also explain the lower ASW values in the R strategy in 2018 compared to R in 2019 (Fig. 1), resulting in longer periods of water stress (Fig. 3). This is especially evident in the $K_{c,act}$ curve for the R strategy in 2018, the hottest year, which overall shows lower values compared to the same strategy in 2019 (Fig. 3). In 2018, the first irrigation event of the FI treatment occurred only 12 days after the onset of stress ($K_s < 1$) and took 23 days to alleviate the water stress (Fig. 3). In contrast, in 2019, there was no water stress in the FI and DI strategies. These differences can be attributed to variations in precipitation (Table 5) and ET_o (Fig. 1) between the two study years.

The irrigation treatments started and ended on the same DOY in both

years. However, during the growing season of 2018, the FI and DI strategies received 28 mm and 17 mm more, respectively, than during the growing season of 2019. Despite the higher amounts of irrigation recorded in 2018, they were not sufficient to prevent water stress, as stress periods were observed in all treatments, including FI (Fig. 3). The occurrence of water stress periods can be identified through $K_s < 1$ (Fig. 3) and when the ASW > RAW (Fig. 2). In the R treatments (Fig. 3 A1, Fig. 3 B1), after the water stress started ($K_s < 1$), there was no recovery until the end of the growing season. However, in the DI treatments (Fig. 3 A2, Fig. 3 B2), the stress periods were shorter in 2019 (only at the end of the growing season), and, in both years, they were also shorter in duration due to irrigation events compensating for the water shortages. In 2019, in the FI treatments (Fig. 3 B3), there were no water stress periods. In 2018 FI, periods of $K_s < 1$ were observed, primarily influenced by climatic factors (Fig. 1); however, $K_s = 1$ was restored when irrigation began (Fig. 3 B3). No differences were observed in K_s , K_e and $K_{c,act}$ between the DI and FI treatments in 2019. This lack of difference was attributed to the precipitation that occurred at the end of the growing season. In 2018, there was greater water stress during this period due to low precipitation. Furthermore, during the initial growth stages (Fig. 3), there were moments when the K_e values closely approached the $K_{c,act}$, reaching 1.2. This can be interpreted as a result of the high rainfall that occurred during these stages, even in the absence of ground cover vegetation (Fig. 4). This evolution in the K_e and $K_{c,act}$ values has been observed by other authors for other *Vitis vinifera* crops, namely 'Godello' and 'Mencía' (Cancela et al., 2015) and Loureiro (Silva et al., 2021).

In analysing the results of $K_{cb, (gcover + crop) act}$ for the three treatments across two seasons (Table 5), a reduction in their potential values is evident, particularly in the R and DI treatments, during the mid-season and the end of the season. The $K_{cb, (gcover + crop) act}$ values during the initial stage (0.21 in 2018 and 0.28 in 2019) were lower than the values reported by previous authors (≈ 0.60) (Yunusa et al., 1997; Fandiño et al., 2012). However, at this stage, no differences between the treatments were observed, as the initial conditions were the same. The values achieved for $K_{cb, (gcover + crop) act}$ (0.22 and 0.28 in 2019 and 2018, respectively) in the mid-season were lower than those presented by Silva et al. (2021), who reported a value of 0.42 for this period.

During the mid-season, the values obtained for $K_{cb, (gcover + crop) act}$ (0.22 in 2019 and 0.28 in 2018) were lower than those presented by (Silva et al., 2021), who reported values of 0.42 for this period. This difference in $K_{cb, (gcover + crop) act}$ is justified by variations in the conditions of the vineyard; for example, the height (2.4 m) and the density of the plant reported for cv. Loureiro (1666 plant ha⁻¹) were greater than in our study (height 1.8 m and density 1111 plant ha⁻¹). In contrast, at the end of the season, slightly lower mean values of $K_{cb, (gcover + crop) act}$ were obtained for the FI and DI treatments (≈ 0.24) compared to the mean values reported by Fandiño et al. (2012) and Silva et al. (2021), who reported $K_{cb, (gcover + crop) act}$ values of 0.30 and 0.41, respectively. However, as shown in Rallo et al. (2021), lower plant densities are associated with a lower K_{cb} .

The fruit yield and pruning wood values showed more significant variations between years than between treatments. In 2018, the production of grapes and pruning wood was significantly higher ($p < 0.001$) than in 2019 (Table 6). These parameters are influenced by the weather conditions, such as precipitation and evapotranspiration (Lisek, 2008; González-Fernández et al., 2020). Despite the higher total precipitation recorded in 2019 (328 mm) compared to 2018 (227 mm), a substantial portion of this precipitation occurred during periods of lower water requirements (initial and rapid growth). In contrast, during the mid-season, when the water requirements were higher, the precipitation was higher in 2018, contributing to the observed differences in the yield (kg ha⁻¹) and pruning wood (kg ha⁻¹). The evapotranspiration did not differ notably between the growing seasons or crop growth stages (Fig. 1), with 882 mm and 814 mm recorded in 2018 and 2019, respectively, evenly distributed across the different crop growth stages.

During the growing seasons, it was observed that the crop and ground cover transpiration treatments exhibited variations at the end of the growing season. These differences were attributed to water stress and were more evident in 2018 due to increased periods of stress.

The SimDualKc software was used to determine the water required to achieve the FY, the transpiration (crop plus ground cover, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) and the actual crop evapotranspiration ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) involved in the different treatments during the two growing seasons. The integration of the model's results in Eqs. 20 to 25 aids in understanding the water productivity (WP) and crop water use efficiency (WUE_c). Regarding the WP results (Table 6), it was observed that when considering variations in ASW between the beginning and end of the growing season, the DI strategy consistently yielded the best results in the three WP indices, regardless of the year; this indicates that this strategy represents the most balanced approach to water usage in relation to production. However, regarding the WP_{FY} index for 2019, the results for the FI strategy were higher than those obtained with DI, although not to a statistically significant degree ($p > 0.05$) (Table 6). In this context, the year with the lowest fruit yield (2019) demonstrates that the FI strategy is more efficient in terms of water usage in grape production in this WP_{GY} when compared to the R treatment ($p < 0.05$). This observation aligns with findings for other grapevine varieties, such as Godello and Treixadura (Trigo-Córdoba et al., 2015), where the water productivity values were slightly higher in treatments that incorporated some level of water stress. The WP values reported in the present study were higher than those reported for Godello and Treixadura, indicating that more water is needed to produce one kilogram of Alvarinho grapes. However, the WP values for the Alvarinho cultivar in this study were similar to those reported in a previous study (Cancela et al., 2016), as well as for the Perlette and Superior varieties (Er-Raki et al., 2021). This study concludes that the irrigation deficit strategy demonstrates the most effective water use, which is why this approach should be adopted for this cultivar.

The water productivity values obtained in this study, which referred to the transpiration and actual crop evapotranspiration, varied significantly between the years. However, our values for 2018 were higher than those obtained by Er-Raki et al., (2021), although they were lower in 2019. In 2019, our values were similar to or greater than those obtained in semiarid climate conditions (Teixeira et al., 2007). In contrast, compared with the values obtained by Fandiño (2021), in the Albariño variety arranged in 'Parra', our values for WP_T and WP_{ETc} were lower, by approximately half. In a similar manner, Phogat et al. (2017) obtained higher values for Chardonnay in Australia. The deficit irrigation strategy showed a positive effect on the yield (+3.6 %) and WP_{ETc} (+4.7 %), contrary to Wen et al. (2023) in vine fruit, where there was a decrease of 9.0 % in the yield in a deficit irrigation strategy, although with an increase of 9.9 % in WP_{ETc} , double that obtained in the Albariño case. Finally, in terms of WUE_c , values lower than 1 were obtained for all treatments. These values are in agreement with the WUE_c values (0.63–0.91) observed in a proximal area to cv. Albariño (Fandiño, 2021).

The water productivity (WP) and crop water use efficiency (WUE_c) values may be improved without a cover crop. This is because the transpiration of the cover crop and its contribution to the evapotranspiration of the current crop, as well as its water consumption, were not considered. However, some authors have reported that the water use by active ground cover is environmentally sustainable when considering the numerous ecosystem services provided by cover crops in vineyards (Lopes et al., 2011; Garcia et al., 2018; Gattullo et al., 2020). These results demonstrate the importance of vineyard management and the local climatic conditions, as factors that allow for adequate comparisons between results. The use of water productivity and water use efficiency indices based on transpiration and/or actual crop evapotranspiration is highlighted as a useful tool to manage irrigation in vineyards in temperate climates. Moreover, water savings in irrigation could be obtained, increasing the WP and WUE_c , although it is necessary to include

the yield and grape quality effects (Chen et al., 2023).

5. Conclusions

In this study, two useful tools for sustainable water management were combined. Through SimDualKc, the dynamics of the evolution of the water in the soil and the subsequent transpiration (T) (crop plus ground cover, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) and $\text{ET}_{c \text{ act}}$ (actual crop evapotranspiration, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) were obtained. These results, when combined with the fruit and pruning yields, demonstrate that the strategy of deficit irrigation is the one that brings the most production and environmental advantages. The current study demonstrated the successful performance of the SimDualKc model for *Vitis vinifera* cv. Alvarinho, considering specific parameters related to the soil, climate, crop stage and irrigation observed in the present work. Adjustments were made to the standard values (Allen et al., 1998) for the 2018 R treatment, resulting in an accurate approximation between the observed and simulated values. The study concludes, in line with the findings of other authors, that the model can correctly predict the ASW. These accurately predicted values can significantly contribute to improved irrigation management throughout the growth season, allowing farmers to improve their water management practices. For practical application, it is recommended to round the values of the basal crop coefficient to 0.15, 0.25 and 0.20 at the beginning, middle and end of the season, respectively. These values are suitable to similar vineyard agronomic conditions with lower vine density and fc, and presence of active ground cover. Regarding water productivity, a significant advantage was observed when employing a deficit irrigation strategy, as it consistently yielded the best WP values in both years. The water extracted from the soil represents a significant portion of the total water consumed by the crop and cover crop during the growing season and therefore must be included in the WP calculations. Incorporating this aspect reduces the differences in WP between treatments, but the most efficient strategy remains deficit irrigation. Given the climate uncertainty that affects this location, with drier summers, the adoption of irrigation systems improves and stabilizes the WP. Conversely, further studies should focus on the economic efficiency related to the installation of irrigation systems in this region. The findings highlight the need for additional studies involving other grapevine cultivars, given the observed high variability in crop coefficients even within similar cultivars, as evidenced by the differences between the studied cultivar and cv. Loureiro (Silva et al., 2021) and cv. Albariño (Fandiño et al., 2012). In future studies, it would be beneficial to incorporate both methodologies to study other varieties of *Vitis vinifera* and under different climatic conditions, as well as to incorporate data from other sources, such as transpiration from sap flow measurements or from lysimeters. Our study was conducted over a two-year period, which may be a limitation in terms of accurately representing crop growing seasons, given the significant climatic differences between the two years. A further limitation of the study is that only 28 production values were obtained for each irrigation strategy in each year, and these were the only values taken into account when calculating the WP. It could therefore be beneficial to analyse more than two years (growing seasons) and a greater number of plants to obtain more robust results.

CRedit authorship contribution statement

Susana Mendes: Writing – review & editing, Validation. **Claúdio Araujo-Paredes:** Writing – review & editing, Data curation. **Simão P. Silva:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Validation, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. **M. Isabel Valín:** Writing – review & editing, Validation, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Javier J Cancela:** Writing – review & editing, Software, Methodology, Conceptualization.

Declaration of Competing Interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests. M Isabel Valin reports equipment, drugs, or supplies was provided by Foundation for Science and Technology. Susana Mendes reports equipment, drugs, or supplies was provided by Foundation for Science and Technology. Claudio Araujo-Paredes reports equipment, drugs, or supplies was provided by Foundation for Science and Technology. Javier J Cancela reports article publishing charges was provided by Consellería de Cultura, Educación e Universidade, Xunta de Galicia. If there are other authors, they declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data Availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

This work was supported by project UIDB/05937/2020 — Center for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS), through national funds from the Foundation for Science and Technology, and Project UIDP/05975/2020, proMetheus—Research Unit on Energy, Materials and Environment for Sustainability. The APC was funded by Consellería de Cultura, Educación e Universidade, Xunta de Galicia (Grupos de Referencia Competitiva ED431C-2021–27), to Jorge Dafonte and María Fandiño, in relation to an ECa study. The authors are grateful to the editors and the anonymous reviewers for their insightful comments and suggestions.

Appendix A. Nomenclature

| | |
|-------------------------------------|--|
| ASW | available soil water (mm) |
| DBR | active ground cover density in inter-row area (%) |
| DI | deficit irrigation |
| DOY | day of year |
| DR | active ground cover density in row (%) |
| ET_c act | actual crop evapotranspiration (mm day^{-1}) |
| ET_o | reference evapotranspiration (mm day^{-1}) |
| f_c | fraction of soil shaded by crop |
| F_r | stomatal adjustment |
| FI | full irrigation |
| GCV | ground cover vegetation |
| FY | vineyard fruit yield (kg ha^{-1}) |
| h | crop height measured from soil (m) |
| HBR | active ground cover height in inter-row area (m) |
| HR | active ground cover height in row (m) |
| K_c act | crop coefficient adjusted to climate and local conditions |
| K_{cb} | basal crop coefficient |
| K_{cb} ($g_{cover} + crop$) act | basal crop and active ground cover coefficient adjusted to climate and actual conditions |
| K_{cb} act | actual crop coefficient |
| K_{cb} crop | main crop basal crop coefficient |
| K_{cb} full end | end full basal crop coefficient |
| K_{cb} full ini | initial full basal crop coefficient |
| K_{cb} full mid | mid-season full basal crop coefficient |
| K_{cb} gcover | ground cover crop coefficient |
| K_e | soil evaporation coefficient |
| K_s | stress coefficient |
| M_L | canopy transparency |
| p | depletion fraction for no stress |
| Prec. | precipitation (mm) |
| PW | pruning wood (kg ha^{-1}) |
| R | rainfed |
| RAW | readily available soil water (mm) |
| REW | readily evaporable water (mm) |
| T | crop and ground cover transpiration ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) |
| TAW | total available soil water (mm) |
| TEW | total evaporable water (mm) |
| TWU | total water use ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) |
| WP | water productivity (kg m^{-3}) |
| WUE_c | crop water use efficiency (-) |
| Z_e | depth of evaporable layer |

Appendix B. Density and height of cover crop in row and inter-row areas in 2018 and 2019 growing seasons

| Year | Day of year | Density in rows (%) | Density between rows (%) | Height in rows (m) | Height between rows (m) | Baggiolini scale (Baggiolini et al., 1993) |
|------|-------------|---------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--|
| 2018 | 95 | 50 | 90 | 0.05 | 0.10 | C |
| | 110 | 60 | 90 | 0.10 | 0.12 | D |
| | 163 | 50 | 60 | 0.05 | 0.05 | I |
| | 172 | 80 | 60 | 0.12 | 0.05 | K |

(continued on next page)

(continued)

| Year | Day of year | Density in rows (%) | Density between rows (%) | Height in rows (m) | Height between rows (m) | Baggiolini scale (Baggiolini et al., 1993) |
|------|-------------|---------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------|--|
| 2019 | 186 | 95 | 80 | 0.18 | 0.15 | L |
| | 215 | 90 | 80 | 0.17 | 0.1 | M |
| | 243 | 85 | 80 | 0.18 | 0.12 | M |
| | 260 | 80 | 80 | 0.15 | 0.15 | N |
| | 84 | 60 | 60 | 0.06 | 0.06 | C |
| | 92 | 70 | 70 | 0.08 | 0.08 | C |
| | 104 | 90 | 90 | 0.18 | 0.18 | C |
| | 106 | 80 | 80 | 0.12 | 0.12 | C |
| | 112 | 80 | 80 | 0.15 | 0.15 | D |
| | 147 | 80 | 10 | 0.18 | 0.03 | I |
| | 154 | 70 | 10 | 0.16 | 0.04 | J |
| | 179 | 80 | 15 | 0.17 | 0.05 | K |
| | 199 | 80 | 15 | 0.17 | 0.06 | L |
| | 224 | 90 | 30 | 0.17 | 0.06 | M |
| | 241 | 90 | 60 | 0.20 | 0.08 | M |
| | 248 | 80 | 40 | 0.16 | 0.10 | M |
| 259 | 70 | 20 | 0.16 | 0.05 | N | |

Appendix C. Location and apparent electrical conductivity

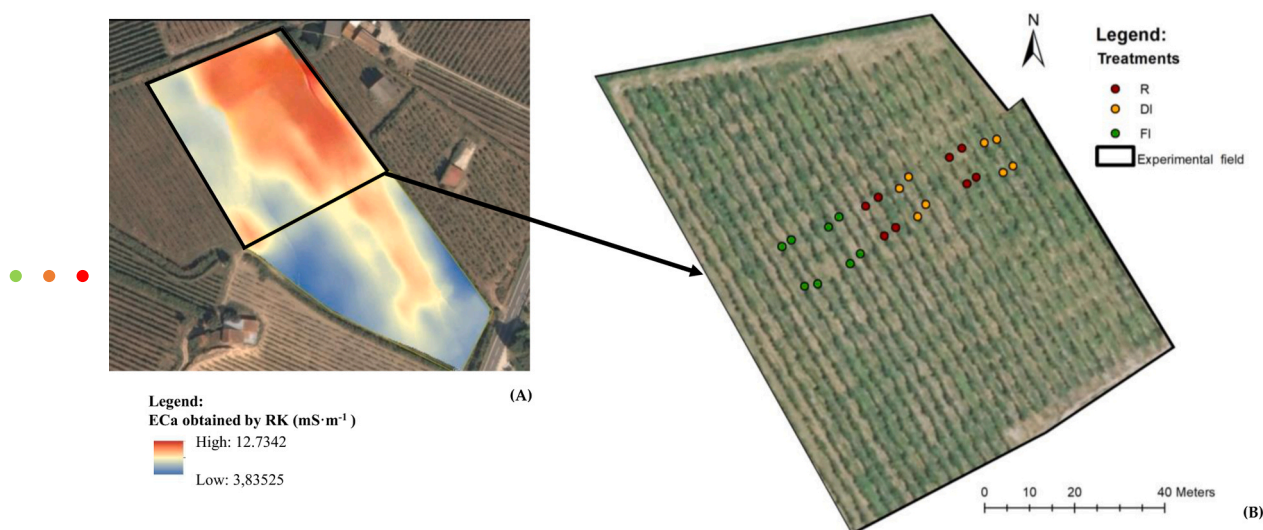


Fig. C.1. Study area. A: Soil electrical conductivity apparent (ECa) map obtained by RK (mS·m⁻¹). B: Positions of access probe tubes located in full irrigation (●), deficit irrigation (○) and rainfed (○) treatments.

Appendix D. Experimental design of each repetition: locations of plants, drippers and access probe tubes

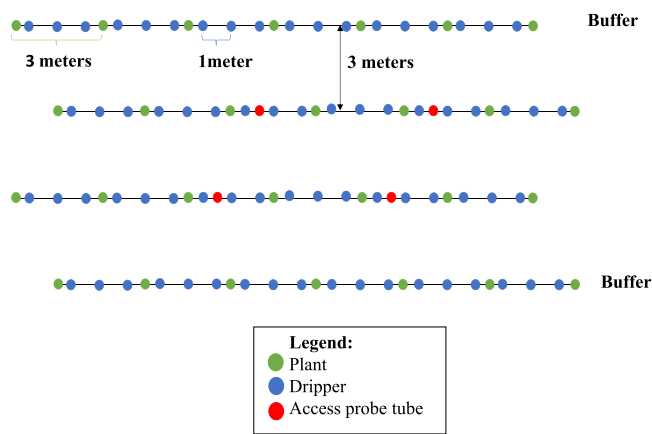


Fig. D.1. Spatial locations of plants, drippers and access probe tubes.



References

- Acevedo-Opazo, C., Ortega-Farías, S., Fuentes, S., 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: an irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agric. Water Manag* 97, 956–964. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.025>.
- Afonso, J.M., Monteiro, A.M., Lopes, C.M., Lourenço, J., 2003. Cover cropping at “Vinhos Verdes” wine region. A three year study in variety ‘Alvarinho’. *Cienc. e Tec. Vitiviníc. V. 18*.
- Ahmadi, S.H., Solgi, S., Sepaskhah, A.R., 2019. Quinoa: A super or pseudo-super crop? Evidences from evapotranspiration, root growth, crop coefficients, and water productivity in a hot and semi-arid area under three planting densities. *Agric. Water Manag* 225, 105784. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105784>.
- Alcamo, J., Flörke, M., Märker, M., 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrol. Sci. J. 52*, 247–275. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.2.247>.
- Allen, R.G., 1996. Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 122, 97–106. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1996\)122:2\(97\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1996)122:2(97)).
- Allen, R.G., Pereira, L.S., 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrig. Sci.* 28, 17–34. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrig. Drain. Pap. 56, 300.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., Jensen, M.E., 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agric. Water Manag* 98, 899–920. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>.
- Araújo-Paredes, C., Portela, F., Mendes, S., Valín, M.L., 2022. Using Aerial Thermal Imagery to Evaluate Water Status in *Vitis vinifera* cv. Loureiro. *Sensors* 22. <https://doi.org/10.3390/s22208056>.
- Baggiolini, M., Lorenz, H., Bleiholder, H., et al., 1993. *Stades phénologiques repères de la vigne*. *Arboric. Hortic.* 44, 7–9.
- Beyá-Marshall, V., Arcos, E., Seguel, Ó., et al., 2022. Optimal irrigation management for avocado (cv. ‘Hass’) trees by monitoring soil water content and plant water status. *Agric. Water Manag* 271. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107794>.
- Brown, I., Poggio, L., Gimona, A., Castellazzi, M., 2011. Climate change, drought risk and land capability for agriculture: Implications for land use in Scotland. *Reg. Environ. Chang* 11, 503–518. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0163-z>.
- Buesa, I., Pérez, D., Castel, J., et al., 2017. Effect of deficit irrigation on vine performance and grape composition of *Vitis vinifera* L. cv. Muscat of Alexandria. *Aust. J. Grape Wine Res* 23, 251–259. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12280>.
- Bwambale, E., Abagale, F.K., Anornu, G.K., 2022. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agric. Water Manag* 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>.
- Cancela, J.J., Fandiño, M., Rey, B.J., Martínez, E.M., 2015. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Mencía). *Agric. Water Manag* 151, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.020>.
- Cancela, J.J., Trigo-Córdoba, E., Martínez, E.M., et al., 2016. Effects of climate variability on irrigation scheduling in white varieties of *Vitis vinifera* (L.) of NW Spain. *Agric. Water Manag* 170, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.004>.
- Chen, V., Khan, T.A., Chiavaroli, L., et al., 2023. Response to comment on “Relation of fruit juice with adiposity and diabetes depends on how fruit juice is defined: a re-analysis of the EFSA draft scientific opinion on the tolerable upper intake level for dietary sugars” by Chen et al. 2023. *Eur. J. Clin. Nutr.* 77, 1178–1179. <https://doi.org/10.1038/s41430-023-01323-6>.
- Civit, B., Piastrellini, R., Curadelli, S., Arena, A.P., 2018. The water consumed in the production of grapes for vinification (*Vitis vinifera*). Mapping the blue and green water footprint. *Ecol. Indic.* 85, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.037>.
- Darouich, H., Karfoul, R., Ramos, T.B., Pereira, L.S., 2023. Setting Irrigation Thresholds for Building a Platform Aimed at the Improved Management of Citrus Orchards in Coastal Syria. *Agronomy* 13. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071794>.
- Djaman, K., O’Neill, M., Owen, C.K., et al., 2018. Crop evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semi-arid climate. *Water (Switz.)* 10. <https://doi.org/10.3390/w10040405>.
- El-Sadek, A., 2014. Water use optimisation based on the concept of Partial Rootzone Drying. *Ain Shams Eng. J.* 5, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.09.004>.
- Er-Raki, S., Bouras, E., Rodriguez, J.C., et al., 2021. Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. *Agric. Water Manag* 245, 106585. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106585>.
- Evvett, S.R., Stone, K.C., Schwartz, R.C., et al., 2019. Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: implications for irrigation management. *Irrig. Sci.* 37, 751–759. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00644-4>.
- Fandiño, M., 2021. *Necesidades de Agua e influencia de los sistemas de riego en Vitis vinifera var. Escuela De Doctorado Internacional De La Universidad De Santiago De Compostela, Albariño*.
- Fandiño, M., Cancela, J.J., Rey, B.J., et al., 2012. Using the dual-K c approach to model evapotranspiration of Albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albariño) with consideration of active ground cover. *Agric. Water Manag* 112, 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.008>.
- FAO & WWC (2015) *Towards a Water and Food Secure Future*. White Paper 61.
- Faticchi, S., Paschalis, A., Bonetti, S., et al (2023) Water use efficiency: A review of spatial and temporal variability. In: Goss MJ, Oliver MBT-E of S in the E (Second E) (eds). Academic Press, Oxford, pp 527–542.
- Fernández, E., 2023. Editorial note on terms for crop evapotranspiration, water use efficiency and water productivity. *Agric. Water Manag* 289, 2021–2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108548>.
- Fernández, J.E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., et al., 2020. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. *Agric. Water Manag* 237, 106074. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>.
- Fischer, G., Tubiello, F.N., van Velthuizen, H., Wiberg, D.A., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. *Technol. Forecast Soc. Change* 74, 1083–1107. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.021>.
- Fraga, H., Malheiro, A.C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J.A., 2014. Climate factors driving wine production in the Portuguese Minho region. *Agric. Meteor.* 185, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.11.003>.
- García, L., Celette, F., Gary, C., et al., 2018. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 251, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.030>.
- Gattullo, C.E., Mezzapesa, G.N., Stellacci, A.M., et al., 2020. Cover crop for a sustainable viticulture: Effects on soil properties and table grape production. *Agronomy* 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091334>.
- González Perea, R., Daccache, A., Rodríguez Díaz, J.A., et al., 2018. Modelling impacts of precision irrigation on crop yield and in-field water management. *Precis Agric.* 19, 497–512. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9535-4>.
- Gonzalez-Fernandez, E., Pina-Rey, A., Fernandez-Gonzalez, M., et al., 2020. Prediction of Grapevine Yield Based on Reproductive Variables and the Influence of Meteorological Conditions. *Agron.-BASEL* 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050714>.
- Goodwin, I., Whitfield, D.M., Connor, D.J., 2006. Effects of tree size on water use of peach (*Prunus persica* L. Batsch). *Irrig. Sci.* 24, 59–68. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0010-z>.
- Iglesias, A., Garrote, L., 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agric. Water Manag* 155, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>.
- Jiang, X., He, L., 2021. Investigation of effective irrigation strategies for high-density apple orchards in pennsylvania. *Agronomy* 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040732>.
- Junquera, P., Lissarrague, J.R., Jiménez, L., et al., 2012. Long-term effects of different irrigation strategies on yield components, vine vigour, and grape composition in cv. Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera* L.). *Irrig. Sci.* 30, 351–361. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0348-y>.
- Kang, S., Gu, B., Du, T., Zhang, J., 2003. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agric. Water Manag* 59, 239–254. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00150-6).
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., et al., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteor. Z.* 15, 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- KPMG International (2012) *Expect the Unexpected: Building business value in a changing world: Executive Summary*. 1–20.
- Lakso, A.N., Santiago, M., Stroock, A.D., 2022. Monitoring Stem Water Potential with an Embedded Microtensiometer to Inform Irrigation Scheduling in Fruit Crops. *Horticulturae* 8. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121207>.
- Lisek, J., 2008. Climatic factors affecting development and yielding of grapevine in central Poland. *J. Fruit. Orn. Plant Res* 16, 285–293.
- Liu, Y., Pereira, L.S., Fernando, R.M., 2006. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agric. Water Manag* 84, 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.01.018>.
- Lopes, C.M., Santos, T.P., Monteiro, A., et al., 2011. Combining cover cropping with deficit irrigation in a Mediterranean low vigor vineyard. *Sci. Hortic. (Amst.)* 129, 603–612. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.033>.
- López-Urrea, R., Montoro, A., Mañas, F., et al., 2012. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature “Tempranillo” wine grapes. *Agric. Water Manag* 112, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.009>.
- Ma, X., Han, F., Wu, J., et al., 2023. Optimizing crop water productivity and altering root distribution of Chardonnay grapevine (*Vitis vinifera* L.) in a silt loam soil through direct root-zone deficit irrigation. *Agric. Water Manag* 277, 108072. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108072>.
- Merriam J.L., Keller J. (1978) *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*. 211:271.
- Mirás-Avalos, J.M., Cancela, J.J., Fandiño, M., et al., 2020. Zoning of a newly-planted vineyard: Spatial variability of physico-chemical soil properties. *Soil Syst.* 4, 1–17. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040062>.
- Nadler, A., 1982. Estimating the soil water dependence of the electrical conductivity soil solution/electrical conductivity bulk soil ratio [Soil salinity]. *J. Soil Sci. Soc. Am. V.* 46.
- Paço, T.A., Pôças, I., Cunha, M., et al., 2014. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *J. Hydrol.* 519, 2067–2080. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.075>.
- Pagay, V., 2022. Evaluating a novel microtensiometer for continuous trunk water potential measurements in field-grown irrigated grapevines. *Irrig. Sci.* 40, 45–54. <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00758-8>.

- Paredes, P., Rodrigues, G.J., Petry, M.T., et al., 2018. Evapotranspiration partition and crop coefficients of Tifton 85 bermudagrass as affected by the frequency of cuttings. Application of the FAO56 dual Kc model. *Water (Switz.)* 10. <https://doi.org/10.3390/w10050558>.
- Pereira, L.S., Paredes, P., Jovanovic, N., 2020a. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agric. Water Manag* 241, 106357. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>.
- Pereira, L.S., Paredes, P., Melton, F., et al., 2020b. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. *Agric. Water Manag* 241, 106197. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197>.
- Pereira, L.S., Paredes, P., Hunsaker, D.J., et al., 2021. a) Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agric. Water Manag* 248. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106697>.
- Pereira, L.S., Paredes, P., Melton, F., et al., 2021b. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height: Practical application to vegetable, field and fruit crops with focus on parameterization. *Agric. Water Manag* 252, 106663. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106663>.
- Pereira, L.S., Paredes, P., Montoya, F., et al., 2023. Single and basal crop coefficients for estimation of water use of tree and vine woody crops with consideration of fraction of ground cover, height, and training system. 3. Tropical and subtropical fruit crops. *Irrig. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00901-7>.
- Phogat, V., Skewes, M.A., McCarthy, M.G., et al., 2017. Evaluation of crop coefficients, water productivity, and water balance components for wine grapes irrigated at different deficit levels by a sub-surface drip. *Agric. Water Manag* 180, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.016>.
- Prieto, J.A., Louarn, G., Perez Peña, J., et al., 2020. A functional-structural plant model that simulates whole- canopy gas exchange of grapevine plants (*Vitis vinifera* L.) under different training systems. *Ann. Bot.* 126, 647–660. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz203>.
- Ragab, R., 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: The SALTMED model. *Environ. Model Softw.* 17, 345–361. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00079-2).
- Rallo, G., Paço, T.A., Paredes, P., et al., 2021. Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. *Agric. Water Manag* 250, 106645. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106645>.
- Rodrigues, G.C., Pereira, L.S., 2009. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. *Biosyst. Eng.* 103, 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.002>.
- Rolim, J., Godinho, P., Sequeira, B., et al., 2007. Assessing the SIMDualKc model for irrigation scheduling simulation in Mediterranean environments. *Water Sav. Mediterr. Agric. Futur Res needs I* 49–61.
- Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., et al., 2012b. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agric. Water Manag* 103, 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.013>.
- Rosa, R.D., Paredes, P., Rodrigues, G.C., et al., 2012a. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. *Agric. Water Manag* 103, 62–77. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.018>.
- Shellee, K.C., 2014. Water productivity, yield, and berry composition in sustained versus regulated deficit irrigation of merlot grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* 65, 197–205. <https://doi.org/10.5344/ajev.2014.13112>.
- Silva, S.P., Valín, M.I., Mendes, S., et al., 2021. Dual Crop Coefficient Approach in *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro. *Agronomy* 11, 2062. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102062>.
- Soltekin, O., Teker, T., Altundişli, A., 2020. Deficit irrigation strategies in *Vitis vinifera* L. ‘Crimson Seedless’ table grape: physiological responses, growth, yield and fruit quality. *Acta Hort.* 1276, 197–204. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1276.28>.
- Teixeira, A.H. d C., Bastiaanssen WGM, Bassoi, L.H., 2007. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin, Brazil. *Agric. Water Manag* 94, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.08.001>.
- Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., Orriols-Fernández, I., Mirás-Avalos, J.M., 2015. Effects of deficit irrigation on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. “Godello” and “Treixadura” in Ribeiro, NW Spain. *Agric. Water Manag* 161, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.011>.
- Trout, T.J., DeJonge, K.C., 2017. Water productivity of maize in the US high plains. *Irrig. Sci.* 35, 251–266. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0540-1>.
- Wen, S., Cui, N., Gong, D., et al., 2023. A global meta-analysis of yield and water productivity of woody, herbaceous and vine fruits under deficit irrigation. *Agric. Water Manag* 287, 108412. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108412>.
- Yunusa, I.A.M., Walker, R.R., Guy, J.R., 1997. Partitioning of seasonal evapotranspiration from a commercial furrow-irrigated Sultana vineyard. *Irrig. Sci.* 18, 45–54. <https://doi.org/10.1007/s002710050043>.
- Yuste, J., Rubio, J.A., Pérez, M.A., 2004. Influence of plant density and water regime on soil water use, water relations and productivity of trellis-trained Tempranillo grapevines. *Acta Hort.* 646, 187–193. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.646.24>.
- Zhang, S., Wang, H., Sun, X., et al., 2021. Effects of farming practices on yield and crop water productivity of wheat, maize and potato in China: a meta-analysis. *Agric. Water Manag* 243, 106444. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106444>.
- Zhou H., Ma L., Zhang S., et al (2023) Effect of Water-Fertilizer Coupling on the Growth and Physiological Characteristics of Young Apple Trees.

4.3 AGRONOMIC AND MUST QUALITY PERFORMANCE OF *VITIS VINIFERA* L. CV. LOUREIRO: A FOUR-YEAR STUDY

Este capítulo corresponde ao seguinte artigo de investigação:

- **Título:** Agronomic and must quality performance of *Vitis vinifera* L. cv. 'loureiro': A four-year study
- **Revista:** Ciência e técnica vitivinícola, Volume 40, 23 July 2025
- **ISSN:** 0254-0223
- **DOI:** <https://doi.org/10.1051/ctv/ctv2025400163>
- **Autores:** Simão P. Silva ^{1,3}, M. Isabel Valín ¹, Susana Mendes ¹, Cláudio Araujo-Paredes ² and Javier J. Cancela ³
- **Afilições:**
 - ¹Centre for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal
 - ²Research Unit in Materials, Energy and Environment for Sustainability (PROMETHEUS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 4900-347 Viana do Castelo, Portugal;
 - ³GI-1716 Projects and Planification, Agroforestry Engineering Department, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Lugo, University of Santiago de Compostela, 27002 Lugo, Spain
- **Contribuição dos autores:**
 - Simão P. Silva:** Revisão e edição, Escrita – rascunho original, Validação, Software, Metodologia, Investigação, Análise formal, tratamento de dados
 - M. Isabel Valín:** Revisão e edição, validação, investigação, análise formal, tratamento de dados, conceptualização.
 - Susana Mendes:** Revisão e edição, Validação.
 - Cláudio Araujo-Paredes:** Redação – revisão e edição, tratamento de dados.
 - Javier J. Cancela:** Revisão e edição, Software, Metodologia, Conceptualização
- **Indicadores (2024):** Fator de impacto, IF (2024): 0.9; Terceiro quartil (Q3)
- **Autorização da editora:** Este artigo é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite a sua utilização, distribuição e reprodução sem restrições em qualquer meio ou formato, para qualquer fim, sem necessidade de autorização específica. Da mesma forma, de acordo com as políticas de direitos de autor da Ciência e Técnica Vitivinícola (<https://www.ctv-jve-journal.org/about-the-journal/copyright-and-licensing-terms-agreement>), a editora do artigo, os autores têm o direito de utilizar e partilhar os seus trabalhos para fins académicos, incluindo em teses.

Article

AGRONOMIC AND MUST QUALITY PERFORMANCE OF *VITIS VINIFERA* L. CV. 'LOUREIRO': A FOUR-YEAR STUDY

DESEMPENHO AGRÓNOMICO E QUALIDADE DO MOSTO DE *VITIS VINIFERA* L. CV. 'LOUREIRO': QUATRO ANOS DE ESTUDO

Simão P. Silva^{1,3*}, M. Isabel Valín¹, Susana Mendes¹, Cláudio Araujo-Paredes², Javier J. Cancela³

¹Center for Research and Development, in Agri-food Systems and Sustainability (CISAS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Rua Escola Industrial e Comercial de Nun'Alvares, 4900-347, Viana do Castelo, Portugal.

²Research Unit in Materials, Energy and Environment for Sustainability (PROMETHEUS), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Rua Escola Industrial e Comercial de Nun'Alvares, 4900-347, Viana do Castelo, Portugal.

³GI-1716 Projects and Planification. Agroforestry Engineering Department, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería Lugo, University of Santiago de Compostela, Spain.

* Corresponding author: Tel.: + 351 961888765; e-mail: silvasimao@esa.ipvc.pt

(Received 05.03.2025. Accepted 09.07.2025)

SUMMARY

In the Vinho Verde region, one of the most widely cultivated grapevine varieties is *Vitis vinifera* L. cv. 'Loureiro', which is produced under a rainfed conditions. However, irrigation is increasing being implemented to mitigate the effects of climate change. In this sense, the present study evaluated three different irrigation management strategies - rainfed (R), deficit irrigation (DI) and irrigation (I) - during four growing seasons, between 2019 and 2022. The main goal was to assess the influence of irrigation strategies on agronomic productivity and must quality. In order to achieve this objective, a set of parameters related to vine yield and must quality was assessed. In addition, the stem water potential (SWP) was measured, and vineyard transpiration and actual evapotranspiration were estimated. The results showed clear seasonality in production, with higher productivity followed by a decline, ranging from 19 766.5 kg/ha in R 2020 to 4 726.1 kg/h in I 2021. The study demonstrated that irrigation has a favourable long-term effect on yield. This phenomenon can be ascribed to the observation that, although only numerical disparities between treatments were detected in the initial years, significant variations ($p < 0.05$) were identified in 2022, between irrigation treatments. Furthermore, the DI strategy exhibited optimal water productivity, indicating high water use efficiency across the entire studied period. These findings suggest that maintenance irrigation, even in cases where it is found to be deficient, can result in enhanced water productivity in the short term, and higher productivity rates in the long-term.

RESUMO

Na região dos Vinhos Verdes, uma das castas mais cultivadas é a *Vitis vinifera* L. cv. 'Loureiro', produzida em condições de sequeiro. No entanto, a rega está a ser cada vez mais implementada para mitigar os efeitos das alterações climáticas. Neste sentido, no presente estudo foram avaliadas três diferentes estratégias de gestão da rega - sequeiro (R), rega deficitária (DI) e rega (I) - durante quatro ciclos culturais, entre 2019 e 2022. O principal objetivo foi avaliar a influência das estratégias de rega na produtividade agronómica e na qualidade do mosto. Para atingir este objetivo, foi avaliado um conjunto de parâmetros relacionados com o rendimento da videira e a qualidade do mosto. Além disso, foi medido o potencial hídrico do ramo (SWP) e estimada a transpiração da vinha e a sua evapotranspiração real. Os resultados mostraram uma clara sazonalidade na produção, com maior produtividade seguida de declínio, variando entre 19 766,5 kg/ha em R 2020 a 4 726,1 kg/ha em I 2021. O estudo demonstrou que a rega tem um efeito favorável a longo prazo na produtividade. Este fenómeno pode ser atribuído à constatação de que, embora apenas tenham sido detetadas disparidades numéricas entre os tratamentos nos anos iniciais, foram identificadas variações significativas ($p < 0,05$) em 2022 entre as estratégias de rega. Além disso, a estratégia DI apresentou uma produtividade hídrica ótima, indicando uma elevada eficiência no uso da água durante todo o período do estudo. Estas descobertas sugerem que a rega de manutenção, mesmo nos casos em que é considerada deficitária, pode resultar numa maior produtividade hídrica a curto prazo e em taxas de produtividade elevadas a longo prazo.

Keywords: Production, grape quality, water productivity, water stress, deficit irrigation.

Palavras-chave: Produção, qualidade da uva, produtividade da água, stress hídrico, rega deficitária.



© Silva *et al.* 2025.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

INTRODUCTION

Grapevines are cultivated across six continents in a variety of climatic conditions. The range and magnitude of environmental factors vary considerably from region to region (Schultz, 2016). The Atlantic region characterized by a temperate climate condition, has a long tradition of wine production. However, it is currently facing challenges due to climate change (Smith *et al.* 2020).

Numerous studies have focused on optimizing grapevine sustainability and productivity, exploring factors such as cover crops (Pou *et al.* 2011), disease prevention (Oliveira and Cunha, 2015; Ruano-Rosa *et al.* 2022), and soil water management (Cancela *et al.* 2016; Cataldo *et al.* 2020). These works also showed that certain cultivars of *Vitis vinifera* exhibit significant variations in production from year to year, with some producing double the yield in one year compared to other years (Blank *et al.* 2019). This seasonality is primarily influenced by climatic conditions (Ferrer-Gallego *et al.* 2012; Kizildeniz *et al.* 2015), soil water availability (Pellegrino *et al.* 2005; Ma *et al.* 2023), and cultivar characteristics (Parker *et al.* 2020; Bern *et al.* 2021). Furthermore, older plants tend to be less affected by seasonal variations (Bou Nader *et al.* 2019).

Climate change is expected to increase the frequency of droughts, intensifying water resources demand and significant agricultural challenges (Gupta *et al.* 2020). To avoid negative outcomes, such as reduced yield and lower wine quality, it is crucial to control plant water stress (Girona *et al.* 2009; Chacón-Vozmediano *et al.* 2020; Zufferey *et al.* 2020). This can be achieved by ensuring adequate water supply to plants. Anticipating future irrigation requirements is crucial to maintaining the regional identity of wine and ensuring the sustainability of the wine sector (Chrysargyris *et al.* 2020). Several approaches are taken to assess crop water status, including aerial photography for vegetation indices (Vélez *et al.* 2019; Caruso *et al.* 2023), canopy temperature analysis (Greer, 2017), photosynthetic rate measurements (Bertamini *et al.* 2006), stomatal conductance assessments (Trenti *et al.* 2021), soil water content monitoring (Zia *et al.* 2009; Gil *et al.* 2014; Cancela *et al.* 2015) and stem water potential (Munitz *et al.* 2018; Tuccio *et al.* 2019). The stem water potential is one of the most widely used and accurate indicators for assessing a crop water status (Santesteban *et al.* 2019). The authors present ranges of values to characterise the level of water stress in grapevines. These ranges are up to -0.6, between -0.6 and -0.9, -0.9 and -1.1, -1.1 and -1.4 MPa, and below -1.4 MPa, representing no stress, weak or mild stress, mild to moderate stress, moderate to severe stress, and severe stress, respectively (Leeuwen *et al.* 2009; Martínez *et al.* 2013; Miras-Avalos and Araujo,

2021). An alternative method to measure the plant water available is to assess the soil water content using equipment such as capacitive probes (Zamorano *et al.* 2021). This equipment provides information on the current soil water content, allowing to check if it is below the readily available water (Romero *et al.* 2024). If the water status is below this level, the plant will be able to continue its activity, but not at maximum performance, as it will be under water stress (Strack and Stoll, 2022).

The application of adequate irrigation at critical growth stages, mainly during the dry years, promotes a balanced vine growth, ensuring expected yields and grape quality (Junquera *et al.* 2012). Studies indicate that reducing or eliminating water stress enhances yield and berry quality attributes such as pH, probable alcohol content and titratable acidity (Acevedo-Opazo *et al.* 2010; Balint and Reynolds, 2013). However, moderate water stress can benefit wine volatile composition (Vilanova *et al.* 2019). In this sense, irrigation management should be tailored to each cultivar, and some cultivars do not justify the use of irrigation (Trigo-Córdoba *et al.* 2015), so it is essential to well characterize the cultivars to maintain high productivity rates and ensure the economic viability of the wine industry (Azorín and García, 2020; Silva *et al.* 2021a).

In the context of climate change, it is crucial to balance economic feasibility with environmental sustainability, which is becoming increasingly important (Wagner *et al.* 2023). Studies have identified targets and indicators for assessing water use in the wine grape production sector. For example, water productivity, calculated as the yield of grapes per unit of water used, has been proposed (Bellvert *et al.* 2020; Er-Raki *et al.* 2021; Silva *et al.* 2024). Another approach to evaluate water use is to compare grape yield with actual transpiration or evapotranspiration of the crop obtained using models such as AquaCrop (Phogat *et al.* 2017) or SimDualKc (Paredes *et al.* 2017).

Grapevine responses to environmental conditions may vary across growing seasons. This study aimed to clarify the response of the cv. 'Loureiro' under different irrigation strategies over four growing seasons. Trends in yield and quality are presented over a significant period to provide reliable results. Furthermore, an additional objective was to determine the efficiency of *Vitis vinifera* L. cv 'Loureiro' production in terms of water use, using water productivity indicators.

MATERIALS AND METHODS

Site

The study was carried out in a commercial vineyard (*Vitis vinifera* L. cv 'Loureiro'), in northwest Portugal (Figure 1), during four growing seasons (2019 to 2022). The region has an Atlantic-

influenced climate, characterised by high annual rainfall (>1200 mm) and relatively mild summers (Fraga *et al.* 2014). According to the Köppen–Geiger classification, it corresponds to the Csb climate type (Kottek *et al.* 2006)..

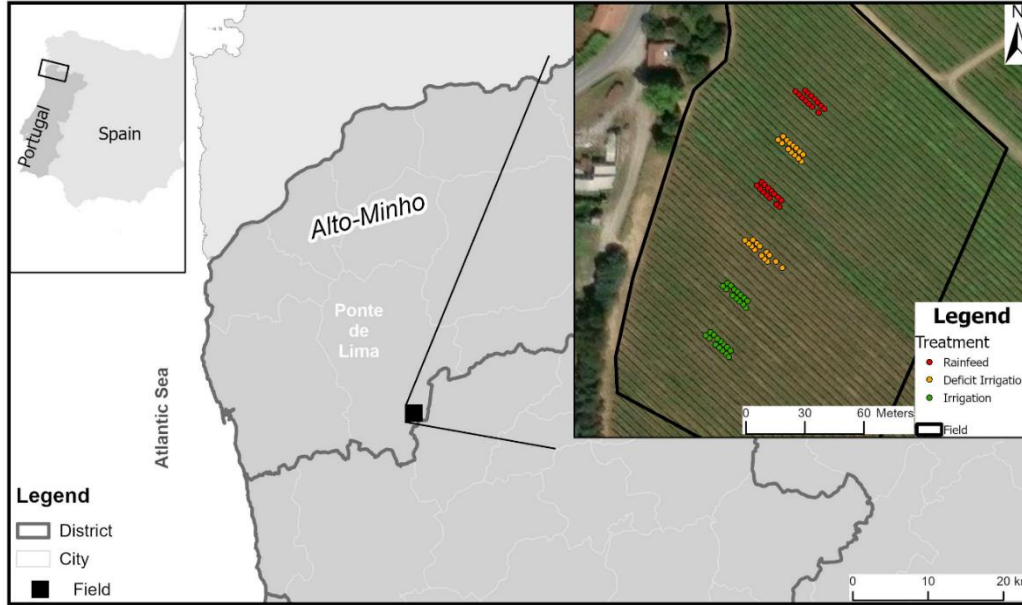


Figure 1. Study area located in northwest Portugal.

The vineyard was established in 2001, has trained to a single upward cordon training system, with a row spacing of 3.0 m and a vine spacing of 2.0 m (1666 vines/ha). The irrigation system consisted of one drip line per row, positioned 40 cm above the ground, with pressure-compensated emitters (4 L/h) spaced one meter apart.

The soil is classified as eutric regosol (WRB, 2014), with a sandy loam texture (70.2% sand, 20.3% silt, and 9.5% clay), and 1.95% organic matter. The total available soil water (TAW) at 0.8 m depth was 100 mm. The TAW was calculated by the difference between the field capacity of the soil and the permanent wilting point using eight different soil layers. To determine the field capacity, a suction of -10 kPa atmosphere was applied to the saturated soil samples using a pressure plate. A suction of -30 kPa was applied to the same samples to determine the wilting point. The field capacity and wilting point values of 0.251 cm³/cm³ and 0.121 cm³/cm³, respectively.

Climate

The meteorological data were collected from a complete weather station, which was installed on the study field, on 21 June 2018. The methodology

proposed by Allen (1996) was followed to ensure the integrity of the data. Subsequently, the reference evapotranspiration (ET_o) was calculated using the FAO Penman-Monteith equation (Allen *et al.* 1998) based on this data (Equation 1). The equation is used to calculate the daily time steps.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 - 0.34U_2)} \quad \text{Eq. 1}$$

where Δ represents the slope of the saturation vapor pressure-temperature relationship at the mean air temperature (kPa/C), R_n is the net radiation at the crop surface (MJ/m²/d), G is the soil heat flux density (MJ/m²/d), γ is the psychrometric constant (kPa/C), T is the mean daily air temperature (°C), U_2 is the wind speed (m/s) at 2 m height and $(e_s - e_a)$ represents the vapour pressure at the reference height of 2 m and the deficit of air (kPa) at 2 m height.

Annual rainfall values ranged from 733 to 1646 mm in 2020 and 2022, respectively. Similar rainfall values of around 1400 mm were recorded in 2019 and 2021. The highest monthly rainfall was recorded

in November 2022, at the end of this study, due to several extreme rainfall events. In all years, the highest monthly rainfall values were recorded between November and February, and the lowest between July and August (Figure 2A).

The correlation between the month and the monthly sum of ET_o is high (R^2), as shown in Figure 2B. The

pattern indicates that the summer months have higher values, while the winter months have lower values in all years of this study. The highest monthly sum of 160 mm was recorded in July 2022, while the lowest monthly sum of just 14 mm was recorded in December 2021.

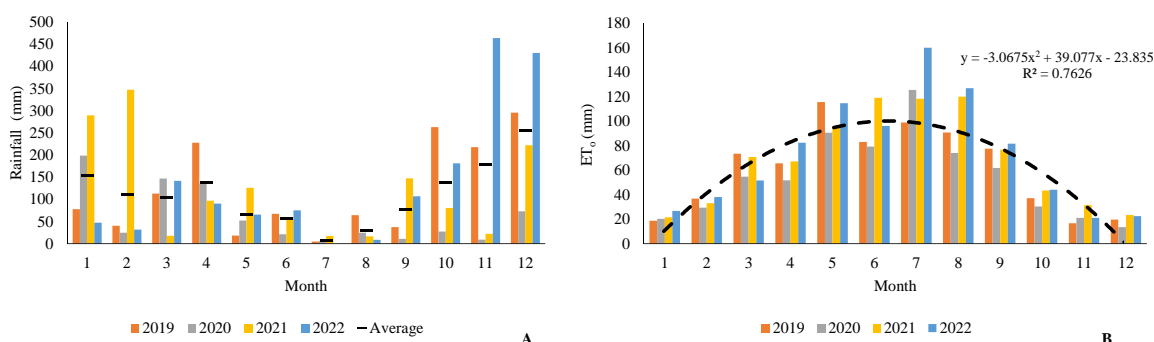


Figure 2. Monthly weather data relative to (A) Rainfall (mm/month) and (B) Reference evapotranspiration (ET_o , mm/month) for the period 2019–2022. The data were collected in a local weather station.

To characterise the climate, bioclimatic indices may be used (Cardoso *et al.* 2019). In this study, the Winkler index (WI), Huglin index (HI), Cool night index (CI), Seljaninov index (SI), and Branas index (BI) were applied. As demonstrated in Figure 2, significant variation in precipitation and ET_o values were observed throughout all growing seasons of the experiment. The application of WI and HI (Table I) revealed that in the initial year (2019), lower results were obtained compared to subsequent years.

Furthermore, CI (minimum temperature) indicated that in 2022, higher minimum temperatures were recorded in September (Table I). Precipitation values fluctuated considerably during the experiment, leading to substantial variations in the indices that relate temperature to precipitation (SI and BI), also being highly divergent across the four years of the study. The year 2022 was distinguished by particularly high precipitation levels, resulting in the highest recorded values in the study (Table I).

Table I

Bioclimatic indices calculated in the years of study (2019-2022)

| Index, abbreviation and author | Results | | | |
|---|---------|------|-------|-------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Winkler index (WI) (Winkler <i>et al.</i> 1974) | 1771 | 2124 | 2146 | 1923 |
| Huglin index (HI) (Huglin, 1978) | 2847 | 2937 | 3139 | 2958 |
| Cool night index (CI) (Tonietto, 1999) | 8.52 | 6.90 | 8.70 | 9.20 |
| Seljaninov index (SI) (Seljaninov, 1966) | 0.27 | 0.13 | 0.53 | 0.80 |
| Branas index (BI) (Branas <i>et al.</i> 1946) | 18654 | 7839 | 14860 | 20227 |

Phenological evolution

Phenological evolution was determined using the Baggiolini scale (Baggiolini, 1952), adapted to the FAO standard crop growth stages (Table II). Therefore, the day that the vine reached stage C (green-tip bud burst) corresponds to initiation.

The day the vine reached stage D (leaf emergence) corresponds to the start of the rapid growth stage. The mid-season stage corresponds to the period between phases I (flowering) and phase M (veraison). Finally, when the vine reached N (maturity), it is considered harvesting (Allen *et al.* 1998).

Table II

Day of the year (DOY) on which the vineyard growth stages were reached in the years 2019 to 2022

| Crop growth stages | Growth season | | | |
|-----------------------------|---------------|------|------|------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Initiation (DOY) | 80 | 61 | 72 | 88 |
| Start rapid growth (DOY) | 85 | 88 | 91 | 110 |
| Start mid-season (DOY) | 157 | 174 | 146 | 144 |
| Start maturity (DOY) | 245 | 233 | 239 | 241 |
| Harvesting (DOY) | 266 | 253 | 250 | 261 |
| Growth season length (Days) | 186 | 192 | 178 | 173 |

Stem water potential, Actual Crop Evapotranspiration, and Transpiration

The stem water potential (SWP) was measured over three growing seasons (2019, 2020, and 2021), using a Scholander pressure chamber (model 670, PMS Instrument Company, OR, USA). To obtain these readings, a mature and healthy leaf from plants 3 and 5 of the central rows (8 replications per treatment and sampling date) was enclosed in an opaque, aluminium-lined bag one hour before solar noon. At solar noon, the leaf was excised from the plant, and SWP readings were recorded (Choné *et al.* 2001).

To obtain actual crop evapotranspiration ($ET_{c\ act}$) and transpiration (T) throughout the growing season, the dual crop coefficient approach (Allen *et al.* 1998) was applied using the SimDualKc software (Rosa *et al.* 2012) with the recommended parameters for *Vitis vinifera* cv. 'Loureiro' (Silva *et al.* 2021b). The basal crop coefficients values ($K_{cb\ full\ ini}$, $K_{cb\ full\ mid}$, and

$K_{cb\ full\ end}$) used were 0.33, 0.79 and 0.60, respectively, and depletion fraction values (p_{ini} , p_{mid} and p_{end}) were 0.45, 0.54 and 0.45, respectively.

Irrigation treatments

In this study, two irrigation treatments were considered: Irrigation (I), determined by the vine grower, and deficit irrigation (DI) which ranged between 25 and 40%, depending on water availability for irrigation. Additionally, a rainfed treatment (R), the most common in the region, was included. Each treatment had two replicates, with each replicate consisting of four rows. The two central rows were used to evaluate all parameters, while the two additional rows were used as buffers. The depth and number of irrigations in each growing season are shown in Table III.

Table III

Irrigation data: depths, numbers and DOY start and end of observed irrigation events, between 2019 and 2022

| Year | Total depth irrigation (mm) | | Number of irrigations | | DOY started | DOY end |
|------|-----------------------------|-------|-----------------------|----|-------------|---------|
| | DI | I | DI | I | | |
| 2019 | 17.33 | 69.67 | 2 | 10 | 142 | 238 |
| 2020 | 32.00 | 94.00 | 6 | 10 | 181 | 239 |
| 2021 | 10.66 | 39.99 | 2 | 4 | 210 | 243 |
| 2022 | 21.33 | 53.33 | 3 | 5 | 207 | 235 |

DOY= day of year; DI= deficit irrigation; I= irrigation.

Production, must quality, and water productivity

The study analysed production parameters related to the number of bunches per plant, production per plant (kg) to determine yield (t/h). In addition, qualitative parameters, such as the weight of 100 berries (g), pH, probable alcohol (%), and titratable acidity (g/L tartaric acid eq.) were obtained.

A total of 28 vines were individually harvested per treatment, resulting in a total of 84 vines. The harvested bunches from each plant were counted and then placed in a container. A portable digital scale (model SD-0206, SANDA, China) was used to weigh the samples, with a maximum deviation of 5g between 0-10kg.

Following weighing, sample bunches of the plant (approximately two kg per repetition) were taken and stored in insulated containers with ice packs, for subsequent laboratory analysis.

In the laboratory, 100 randomly selected berries from each sample were weighed using an electronic balance with a maximum error of 0.01g. The samples were then crushed, and the soluble solids (° Brix) were measured using a digital refractometer (PEN-PRO 3730, ATAGO, Japan), which was converted to probable alcohol (%). pH and titratable acidity (g/L) were also measured, with acidity determined by the amount of NaOH (mL) using the semiautomatic titrator (PH-Burette 24, CRISON, Spain). The procedures were carried out over a four-year period, except for 2020 when laboratory tests were not possible due to pandemic-related constraints (COVID-19).

In this study, the concept of water productivity is based on the correlation between grape yield (GY) and three parameters: total water use (TWU), transpiration (T), and current crop evapotranspiration ($ET_{c\ act}$), using Equations 2, 3 and 4. The TWU represents the total water used during the production cycle and was calculated by adding precipitation, irrigation, and the variation in soil water content over the growing season. The T and $ET_{c\ act}$ were determined using the SimDualKc results (Silva *et al.* 2021b).

$$WP_{TWU} = \frac{GY}{TWU} \quad \text{Eq. 2}$$

$$WP_T = \frac{GY}{T} \quad \text{Eq. 3}$$

$$WP_{ET} = \frac{GY}{ET_{c\ act}} \quad \text{Eq. 4}$$

where TWU corresponds to the water used (which includes rainfall, soil water storage, capillary rise and irrigation applied.), GY refers to achieve grape yielded (Kg/ha), T refers to transpiration (crop plus ground cover, m^3/ha) and $ET_{c\ act}$ is actual crop evapotranspiration (m^3/ha).

Statistical analysis

To analyse the variability of treatment means and perform post hoc comparisons, a one-way ANOVA was conducted using in SPSS 27. The post hoc tests were performed using Duncan's test with a significance level of $p < 0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

Climate during growing seasons

The impact of climatic factors on viticulture is a well-documented phenomenon, with variables such as temperature, relative humidity, wind speed and reference evapotranspiration (ET_o) directly

influencing vine development and grape quality (Prada *et al.* 2024). Data obtained from the meteorological station installed on site revealed significant variations in the average annual temperature throughout the growing seasons. Specifically, in 2019, the mean temperature was recorded at 18.2 °C, with a minimum of 6.8 °C (DOY 94) and a maximum of 27.1 °C (DOY 192). In 2020, a decline was observed to 17.3 °C, with no significant alteration in the extreme values observed in the preceding year. In 2021, the average temperature increased slightly to 17.6 °C, with a slight rise in extreme values, ranging from a minimum of 9.4 °C (DOY 72) to a maximum of 27.4 °C (DOY 235). A significant increase in the average temperature was observed in 2022 to 19.1 °C, with a maximum peak of 30.8 °C (DOY 193). The progressive rise in average temperatures, especially in 2022, suggests an impact on the phenological cycle of the vines, including accelerated ripening (Dinis *et al.* 2022), leading to a shorter growing season (Table II).

The mean relative humidity exhibited minimal variability, fluctuating from 73.80% in 2019 to 78.72% in 2021. However, the minimum values demonstrated greater variation. The years 2020 and 2022 were characterised by the lowest relative humidity levels, with minimum values of 51% (DOY 196) and 50% (DOY 231), respectively. Regarding the wind in 2019, the average speed was recorded at 1.12 m/s, while in 2020, it experienced a decline to 1.05 m/s. In the subsequent years, a steady increase was observed, with 1.51 m/s in 2021 and 1.59 m/s in 2022. A significant variation in growing seasons precipitation was observed between 2019 and 2022, with 2019 recording the highest accumulation (394 mm) and 2021 the lowest (323 mm). Furthermore, 2022 was distinguished by its high number of rainy days (81), in contrast to 2019 and 2020, which recorded only 55 days with precipitation. It was also observed that the greatest rainfall tends to occur at the beginning of the harvest.

A significant increase in the average ET_o was observed during the growing seasons (Figure 2). Specifically, the average recorded in 2019 was 2.99 mm/day, which decreased to 2.60 mm/day in 2020. Subsequent years witnessed a marked increase, reaching 3.36 mm/day in 2021 and 3.60 mm/day in 2022. This increase in ET_o can be attributed to an increased water demand by plants, particularly in 2022, when a combination of high temperature and high ET_o .

The results indicate that the years analysed presented distinct climatic conditions, with emphasis on the increase in average temperature and ET_o in 2022, bringing forward the harvest by 16 days, compared to the average in years 2019 and 2020.

Such climatic changes are likely to impact viticulture, reducing the days of vegetative growth (Table II), vine metabolism and quality of the grapes (Cunha *et al.* 2020; Dinis *et al.* 2022).

Stem Water Potential, Actual Crop Evapotranspiration, and Transpiration

Figure 3 shows the SWP in three growing seasons. It is evident that there are no significant differences

between treatments in the same DOY (Figure 3.A.1., B.1. and C.1.). However, the values achieved by irrigation treatment are slightly better than those of the other treatments in most DOYs. This fact is reflected where the mean SWP for treatments during the entire season shows differences between treatments (Figure 3.A.2., B.2. and C.2.).

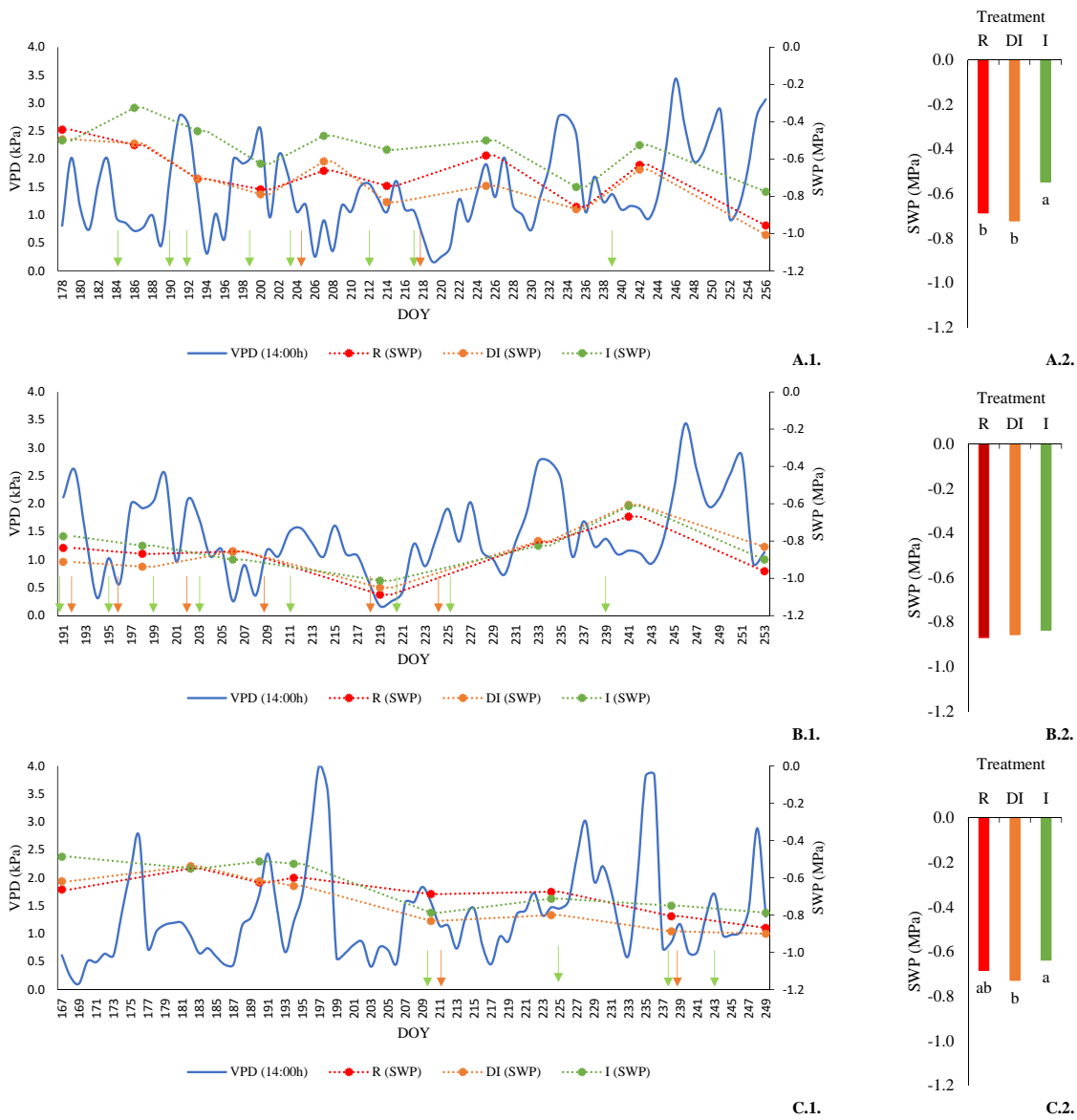


Figure 3. Vapor pressure deficit (VPD) at 14:00 (solar noon) and stem water potential (SWP, MPa) for control treatments (R), deficit irrigation (DI), and irrigation (I) measured during the growing seasons 2019 (A), 2020 (B) and 2021 (C) for the evolution of SWP during the season (1) and the mean SWP for each season (2). Arrows indicate irrigation moments for DI (↓) and I (↑) treatments. Different letters indicate a significant difference between groups with $p < 0.05$, using one-way ANOVA followed by Duncan's post hoc test.

As previously documented by other researchers (Williams and Baeza, 2007), the SWP (Figure 3) exhibited a notable response to prevailing climatic conditions. Despite the observed variations among the treatments, these differences did not attain statistical significance across any of the designated DOY as other authors had already reported (Santesteban *et al.* 2011, 2019). According to Leeuwen *et al.* (2009), the vineyard was mostly subjected to no stress or weak to mild stress, with occasional instances of moderate to severe stress (Figure 3A). This finding is consistent with the results reported by Gil *et al.* (2014) and Cole and Pagay (2015), who also occasionally recorded values lower than -1.2 MPa. Although no noticeable differences were observed when analysing the set of dates, significant differences were found between the treatments in 2019 and 2021 (Figure 3B).

Strategy I exhibited better results (lower SWP) than the other treatments, as previously described by Martínez *et al.* (2013). Considering all growing seasons, differences were found between the DOY (Figure 3A). In 2019 and 2021 the SWP values gradually decreased throughout the growing season, as reported in several previous references (Olivo *et al.* 2009). Nevertheless, in 2020, a decline in stress conditions, lower VDP and ETo values in the middle phase resulted in a subsequent decrease in SWP

values in this phase, as described by Morabito *et al.* (2022) that suitable conditions can rapidly increase the SWP. The analysis of Figure 3A also, suggests a strong direct relationship between SWP and VDP as the lowest SWP readings were recorded a few days after periods of higher VPD readings are obtained days after the occurrence of higher VDP.

Regarding the values obtained for actual crop evapotranspiration and transpiration, significant differences were observed between treatments and crop years (Table IV). In 2020, treatment R had the lowest ET_{c act} and transpiration values, whereas in 2022 treatment I recorded the highest values for these indicators (Table IV). In this sense, the results obtained using SIMDualKc enabled a precise assessment of the differences between the values of ET_{c act} (mm) and transpiration (mm) across treatments and seasons (Table IV). Regarding the ET_{c act}, values ranged from 269 mm (R-2020) to 396 mm (I-2022). Similarly, transpiration showed considerable variation, with values ranging from 140 mm (R-2020) to 241 mm (I-2022). Such differences have already been reported in vineyards, with a about 52% and about 42% difference between the extreme values in ET_{c act} (mm) and Transpiration (mm), respectively (Fandiño, 2021), similar results have also been reported for the olive (Paço *et al.* 2019; Puig-Sirera *et al.* 2021).

Table IV

Actual crop evapotranspiration and transpiration for four years (2019 to 2022 obtained using SIMDualKc

| Year | Treatment | ET _{c act} (mm) | Transpiration (mm) |
|------|-----------|--------------------------|--------------------|
| 2019 | R | 325 | 198 |
| | DI | 336 | 207 |
| | I | 359 | 216 |
| 2020 | R | 269 | 140 |
| | DI | 291 | 154 |
| | I | 306 | 163 |
| 2021 | R | 365 | 219 |
| | DI | 371 | 222 |
| | I | 385 | 234 |
| 2022 | R | 361 | 207 |
| | DI | 372 | 229 |
| | I | 396 | 241 |

Where: ET_{c act} represents actual crop evapotranspiration in mm, R is control treatment, DI is deficit irrigation treatment and I correspond to irrigation treatment.

Production and Quality

Regarding the qualitative and quantitative parameters resulting from the treatments, it was found that there were no significant differences between the treatments under the same climatic conditions. The observed differences were related to the number of bunches per vine in 2019, the fresh mass of 100 berries in 2020 and 2022, and the yield in 2022 (Table V). However, over the years with different irrigation treatments, there was a slight tendency for higher irrigation levels to increase yield, number of bunches per vine, fresh berry mass, pH, and total acidity. In contrast, higher irrigation led to lower probable alcohol (Table V).

The absence of differences in production parameters between irrigation treatments is consistent with the findings described for the *cv.* ‘Godello’ (Trigo-Córdoba *et al.* 2015) and *cv.* ‘Chardonnay’ (Ma *et al.* 2023). However, in 2022, treatment I yielded approximately 54% more than treatment R, indicating significant differences in that year (Table V). This behaviour was not only due to the irrigation applied in that year, but also to the influence of continuous irrigation during previous years (Munitz *et al.* 2017). Table V shows a progressive increase in

the difference in yield between treatments R and I over the years, culminating in 2022 with a higher yield. This trend aligns with previous studies on *cv.* ‘Monastrell’ (Romero *et al.* 2016) and *cv.* ‘Cabernet Sauvignon’ (Junquera *et al.* 2012), in which long-term irrigation treatments caused differences in yield and other parameters. In 2019, additional differences were observed in bunches per vine (Table V), where treatment I recorded the highest mean value ($P < 0.05$). Additionally, in two years, the fresh mass of the berries was higher in treatment I compared to treatment R (Table V), in agreement with reporting for *cv.* ‘Verdejo’ (Vilanova *et al.* 2019). However, no significant differences were found between treatments in qualitative parameters, such as pH, probable alcohol, and titratable acidity (Table V), similar to what was reported for *cv.* ‘Albariño’ and *cv.* ‘Godello’ (Cancela *et al.* 2016). Therefore, it is possible to conclude that irrigation did not influence the quality parameters in this cultivar under the given climatic conditions. In contrast, irrigation was found to decrease probable alcohol content in *cv.* ‘Cabernet Sauvignon’ (Acevedo-Opazo *et al.* 2010) and increase titratable acidity (Junquera *et al.* 2012), with no differences in pH in either study.

Table V

Production and quality parameters related all five growing seasons (2019 to 2022) in different treatments.

| Year | Treatment | Yield (t/ha) | Bunches per vine | Fresh mass of 100 berries (g) | pH | Probable alcohol (%) | Titratable acidity (g/L tartaric acid eq.) |
|------|-----------|---------------------|---------------------|-------------------------------|------|----------------------|--|
| 2019 | R | 9.87 | 32.04 ^b | 191.67 | 3.07 | 10.89 | 7.90 |
| | DI | 12.04 | 38.00 ^{ab} | 184.14 | 2.99 | 10.79 | 7.25 |
| | I | 13.13 | 42.82 ^a | 196.29 | 2.98 | 10.18 | 8.31 |
| 2020 | R | 19.77 | 51.21 | 163.09 ^a | - | - | - |
| | DI | 20.28 | 52.50 | 181.47 ^b | - | - | - |
| | I | 22.89 | 62.04 | 191.06 ^b | - | - | - |
| 2021 | R | 4.72 | 14.29 | 192.08 | 2.83 | 10.80 | 7.27 |
| | DI | 6.52 | 18.50 | 203.64 | 2.84 | 11.20 | 7.32 |
| | I | 7.23 | 19.14 | 207.78 | 2.90 | 11.30 | 8.28 |
| 2022 | R | 12.57 ^b | 30.79 | 163.25 ^a | 3.01 | 10.06 | 7.64 |
| | DI | 16.85 ^{ab} | 40.07 | 177.66 ^{ab} | 3.01 | 10.25 | 7.82 |
| | I | 19.36 ^a | 41.33 | 188.66 ^b | 3.12 | 10.63 | 7.88 |

Different letters indicate a significant difference between groups with $p < 0.05$, using one-way ANOVA followed by Duncan’s post hoc test. R= control, DI= deficit irrigation; I = irrigation.

Although no differences were observed between treatments, there were significant differences between the growing seasons. Seasonal variation can be observed in the parameters such as yield, bunches per vine and fresh mass of 100 berries. The interannual variation in production and quality is shown in Figure 4. However, the average yield was 14.66 t/ha, a value similar to that reported by Oliveira *et al.* (2020) for healthy plants of the *cv.* ‘Loureiro’. As demonstrated in Figure 4, there is a clear indication of interannual variability in the yield, bunches per vine, and fresh berry mass in this study. Yield ranged from 6.16 t/ha (in 2021) and 20.98 t/ha (in 2020), bunches per vine between approximately 17 (in 2021) and 55 (in 2020), and fresh mass of 100 berries between 179 g (in 2021) and 201 g (in 2020). In this sense, there is a clear seasonality effect since

years with high production are preceded by years with significantly lower values (Figure 4A). Similar trend has been reported in the Douro region (Cunha and Richter, 2012) and in other cultivars such as *cv.* ‘Tempranillo’ (Intrigliolo and Castel, 2009) and *cv.* ‘Merlot’ (Chacón-Vozmediano *et al.* 2020). On average, the pH, probable alcohol, and titratable acidity values were 2.97, 10.68%, and 7.74 g/L, respectively (Figure 4 D, E, F). Nevertheless, significant fluctuations were observed over the years. These fluctuations have also been reported in other studies with different grape varieties (Balint and Reynolds, 2013; Romero *et al.* 2016). These findings underscore the importance of considering water productivity when planning the irrigation strategy for vineyard (Junquera *et al.* 2012), as proposed in the next section.

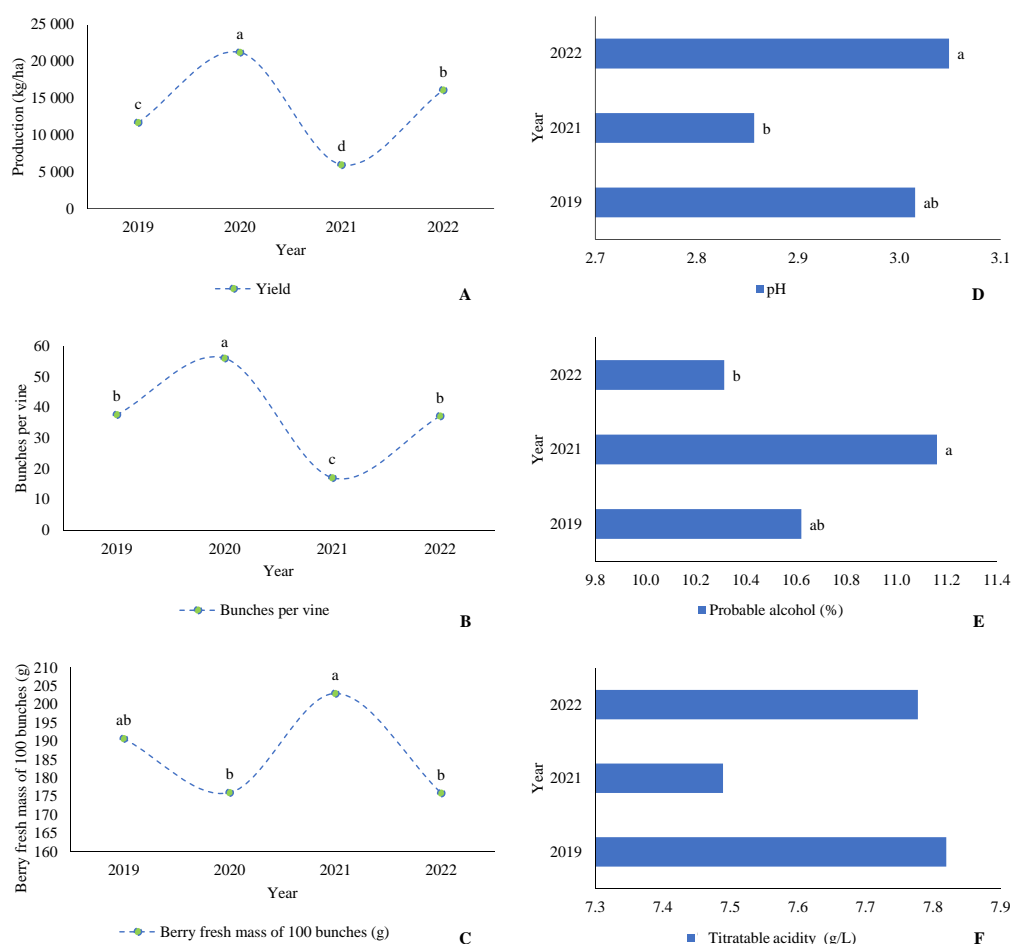


Figure 4. Yield (A), bunches per vine (B), fresh mass of 100 berries (g) (C), pH (D), probable alcohol (E) and titratable acidity (F) related all four growing seasons (2019 to 2022). Different letters indicate a significant difference between groups with $p < 0.05$, using one-way ANOVA followed by Duncan’s post hoc test.

Water Productivity

The results of the water productivity calculations are presented in Table VI. Significant differences were found between treatments R, DI, and I in all years except 2021. Additionally, DI treatment consistently produced the best results, although it did not always have the highest numerical values, since it consistently showed values without significant differences. Treatment I only showed significantly better values than the control treatment in 2022, regardless of the parameter.

It is evident that the most beneficial irrigation strategy is DI, because regardless of the year, the WP in the DI strategy always generates the best result (Table VI). This finding aligns with the results reported by other authors (Shellie, 2014; Ma *et al.* 2023). However, it is important to note that WP can vary depending on the location and cultivar. For example, in Italy with *cv.* ‘Cannonau’, some authors found that lower irrigation levels can lead to higher WP values (Oliveira *et al.* 2013). The highest values

of the WP_{GY} , WP_T and $WP_{ETc\ act}$ were recorded in DI-2020, where 4.73, 7.87 and 14.89 kg/m^3 were obtained, respectively. On the contrary, the lowest values of these same indicators were recorded in DI-2021, at 1.07, 1.27 and 2.13 kg/m^3 , respectively (Table VI). These values varied greatly over the years (Table VI and Figure 5), and were strongly influenced by the variation in grape yield (GY) (Figure 4). Thus, Figure 5 shows a similar trend to that reported in production: a high WP value is preceded by a significantly lower one. Significant variations in WP have also been reported for *cv.* ‘Albariño’ (Mirás-Avalos *et al.* 2016), but they were less pronounced than those recorded in this work. It should be noted that the $WP_{ETc\ act}$ in 2020 stands out as a strange value compared to all other values obtained in this study, as well as those presented by Phogat *et al.* (2017), who obtained values of approximately 6 kg/m^3 . This anomaly is ascribed to the exceptionally high productivity observed in 2020 compared to the other years in the study.

Table VI

Mean of water productivity (WP) in function grape yield (GY), transpiration (T), and actual crop evapotranspiration ($ET_{c\ act}$) and, related for four growing seasons (2019 to 2022) in different treatments

| Year | Treatment | WP_{GY} (kg/m^3) | WP_T (kg/m^3) | $WP_{ETc\ act}$ (kg/m^3) |
|------|-----------|------------------------|----------------------|------------------------------|
| 2019 | R | 2.76 ± 0.30^a | 4.04 ± 0.44^a | 6.65 ± 0.72^a |
| | DI | 2.39 ± 0.20^{ab} | 3.58 ± 0.30^{ab} | 5.83 ± 0.49^{ab} |
| | I | 1.76 ± 0.19^b | 2.75 ± 0.30^b | 4.58 ± 0.50^b |
| 2020 | R | 4.39 ± 0.34^a | 7.53 ± 0.58 | 14.52 ± 1.12 |
| | DI | 4.73 ± 0.32^a | 7.87 ± 0.54 | 14.89 ± 1.02 |
| | I | 3.11 ± 0.40^b | 6.45 ± 0.83 | 12.09 ± 1.55 |
| 2021 | R | 1.50 ± 0.17 | 1.79 ± 0.21 | 2.98 ± 0.35 |
| | DI | 1.07 ± 0.14 | 1.27 ± 0.17 | 2.13 ± 0.29 |
| | I | 1.59 ± 0.28 | 1.88 ± 0.33 | 3.09 ± 0.54 |
| 2022 | R | 3.22 ± 0.41^b | 3.49 ± 0.44^b | 6.07 ± 0.77^b |
| | DI | 4.20 ± 0.31^{ab} | 4.54 ± 0.33^{ab} | 7.36 ± 0.54^{ab} |
| | I | 4.55 ± 0.32^a | 4.89 ± 0.34^a | 8.02 ± 0.57^a |

Different letters indicate a significant difference between groups with $p < 0.05$, using one-way ANOVA followed by Duncan's post hoc test. \pm represents the Standard error. R= control, DI= deficit irrigation; I= irrigation.

Comparing the years, 2020 had the best values for all WP parameters, while the following year (2021) showed the lowest values (Figure 5). The pattern observed indicates interannual oscillation in this

parameter: years with high values tend to be both preceded and followed by years with lower values, similar to the behaviour documented for production.

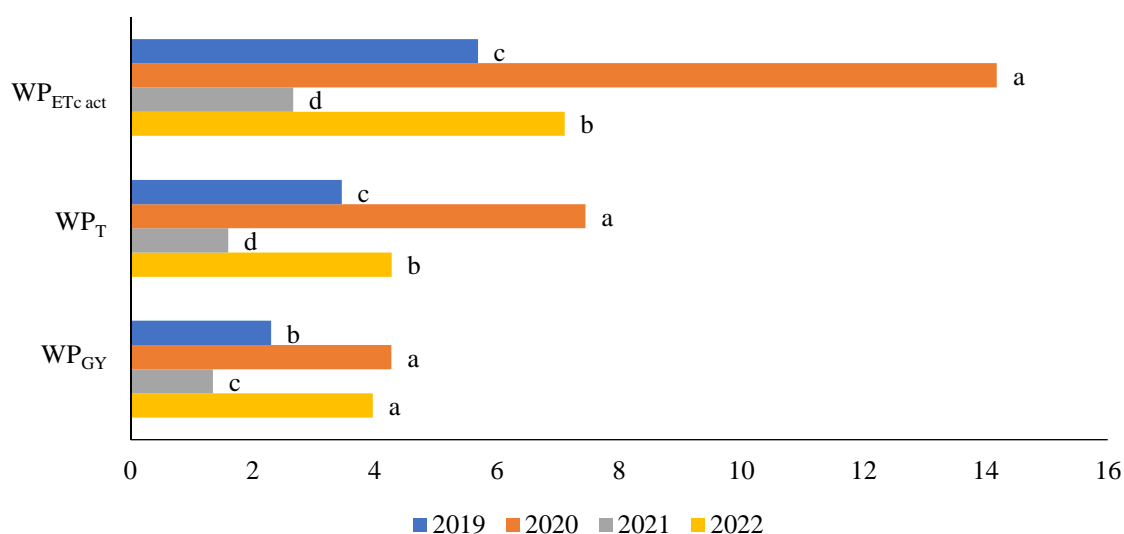


Figure 5 Variation in water productivity (WP) in function of grape yield (GY), Transpiration (T) and actual crop evapotranspiration ($ET_{c\ act}$) during four growing seasons (2019 to 2022). Different letters indicate a significant difference between groups with $p < 0.05$, using one-way ANOVA followed by Duncan’s post hoc test.

CONCLUSIONS

During the growing cycle *cv.* ‘Loureiro’, variations in stem water productivity were observed over time. However, irrigation strategies did not result in significant differences when comparing measurements taken on the same date. Additionally, the plants were rarely subjected to moderate or severe stress in all treatments.

Similarly, no significant differences in annual productivity and quality were observed between treatments during the first three years. However, in the last year, such differences emerged, indicating that accumulated water stress over several years could lead to reduced productivity under rainfed conditions.

Additionally, the present study demonstrated a clear annual fluctuation in yield, along with substantial variations in the number of bunches per plant and grape weight. These fluctuations were evident over time, with years of high production often succeeded by years of low production.

Based on water productivity indicators, the DI strategy has consistently proven to be the most efficient. Therefore, it is recommended to apply this

strategy in the region for this cultivar. This approach ensures superior production efficiency without compromising grape yield and quality.

Future studies should further investigate the observed seasonal variability in productivity and assess whether deficient irrigation strategies remain beneficial in the context of climate change.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by project UIDB/05937/2020 — Center for Research and Development in Agrifood Systems and Sustainability (CISAS), through national funds from the Foundation for Science and Technology, and project UIDP/05975/2020, proMetheus—Research Unit on Energy, Materials and Environment for Sustainability. The English revision was funded by Consellería de Cultura, Educación e Universidade, Xunta de Galicia (Grupos de Referencia Competitiva ED431C-2021-27).

CONFLICTS OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Acevedo-Opazo C., Ortega-Farías S., Fuentes S., 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agric. Water Manag.*, **97**, 956–964.
- Allen R.G., 1996. Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *J. Irrig. Drain Eng.*, **122**, 97–106.
- Allen R.G., Pereira L.S., Smith M., Raes D., 1998. Crop Evapotranspiration. Guide- lines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrig. Drain Pap.*, **56**, 300.
- Azorín P.R., García J.G., 2020. The productive, economic, and social efficiency of vineyards using combined drought-tolerant rootstocks and efficient low water volume deficit irrigation techniques under mediterranean semiarid conditions. *Sustain*, **12**, 1930.
- Baggiolini M., 1952. Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue romande d'Agriculture et d'Arboriculture*, **8**, 4–6
- Balint G., Reynolds A.G., 2013. Effect of different irrigation strategies on vine physiology, yield, grape composition and sensory profile of Sauvignon blanc (*Vitis vinifera* L.) in a cool climate area. *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin*, **47**, 159–181.
- Bellvert J., Mata M., Vallverdú X., Paris C., Marsal J., 2020. Optimizing precision irrigation of a vineyard to improve water use efficiency and profitability by using a decision-oriented vine water consumption model. *Precis. Agric.*, **22**, 319–341.
- Bernáth S., Paulen O., Šiška B., Kus Z., František T., 2021. Influence of Climate Warming on Grapevine (*Vitis vinifera* L.) Phenology in Conditions of Central Europe (Slovakia). *Plants*, **10**, 1020.
- Bertamini M., Zulini L., Muthuchelian K., Nedunchezian N., 2006. Effect of water deficit on photosynthetic and other physiological responses in grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Riesling) plants. *Photosynthetica*, **44**, 151–154.
- Blank M., Hofmann M., Stoll M., 2019. Seasonal differences in *Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir fruit and wine quality in relation to climate. *OENO One*, **53** 189–203.
- Bou Nader K., Stoll M., Rauhut D., Patz C.D., Jung R., Loehnertz O., Schultz H.R., Hilbert G., Renaud C., Roby J.P., 2019. Impact of grapevine age on water status and productivity of *Vitis vinifera* L. cv. Riesling. *Eur. J. Agron.*, **104**, 1–12.
- Branas J., Bernon G., Levadoux L., 1946. Eléments de viticulture générale. 400pp. École National d'Agriculture de Montpellier.
- Cancela J.J., Fandiño M., Rey B.J., Martínez E.M., 2015. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Mencía). *Agric. Water Manag.*, **151**, 52–63.
- Cancela J.J., Trigo-Córdoba E., Martínez E.M., Rey B.J., Bouzas-Cid Y., Fandiño M., Mirás-Avalos J.M., 2016. Effects of climate variability on irrigation scheduling in white varieties of *Vitis vinifera* (L.) of NW Spain. *Agric. Water Manag.*, **170**, 99–109.
- Cardoso A.S., Alonso J., Rodrigues A.S., Araújo-Paredes C., Mendes S., Valín M.I., 2019. Agro-ecological terroir units in the North West Iberian Peninsula wine regions. *Appl. Geogr.*, **107**, 51–62.
- Caruso G., Palai G., Tozzini L., D'Onofrio C., Gucci R., 2023. The role of LAI and leaf chlorophyll on NDVI estimated by UAV in grapevine canopies. *Sci. Hortic.* (Amsterdam), **322**, 112398.
- Cataldo E., Salvi L., Sbraci S., Storchi P., Mattii G.B., 2020. Sustainable Viticulture: Effects of Soil Management in *Vitis vinifera*. *Agronomy*, **10**, 1949.
- Chacón-Vozmediano J.L., Martínez-Gascuña J., García-Navarro F.J., Jiménez-Ballesta R., 2020. Effects of water stress on vegetative growth and 'Merlot' grapevine yield in a semi-arid mediterranean climate. *Horticulturae*, **6**, 95.
- Choné X., Van Leeuwen C., Dubourdieu D., Gaudillère J.P., 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Ann. Bot.*, **87**, 477–483.
- Chrysargyris A., Xylia P., Litskas V., Stavrinides M., Heyman L., Demeestere K., Höfte M., Tzortzakis N., 2020. Assessing the impact of drought stress and soil cultivation in Chardonnay and Xynisteri grape cultivars. *Agronomy*, **10**, 670.
- Cole J., Pagay V., 2015. Usefulness of early morning stem water potential as a sensitive indicator of water status of deficit-irrigated grapevines (*Vitis vinifera* L.). *Sci. Hortic.* (Amsterdam), **191**, 10–14.
- Cunha M., Richter C., 2012. Measuring the impact of temperature changes on the wine production in the Douro Region using the short time fourier transform. *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 357–370.
- Cunha M., Richter C., Mario C., Christian R., 2020. Climate-induced cyclical properties of regional wine production using a time-frequency approach in douro and minho wine regions. *Ciência Téc. Vitiv.*, **35**, 16–29.
- Dinis L.T., Bernardo S., Yang C.Y., Fraga H., Malheiro A.C., Moutinho-Pereira J., Santos J.A., 2022. Mediterranean viticulture in the context of climate change. *Ciência Téc. Vitiv.*, **37**, 139–158.
- Er-Raki S., Bouras E., Rodriguez J.C., Watts C.J., Lizarraga-Celaya C., Chehbouni A., 2021. Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. *Agric. Water Manag.*, **245**, 106585.
- Fandiño M., 2021. *Necesidades de Agua e influencia de los sistemas de riego en Vitis vinifera var. Albariño*. 153 p. PhD Thesis, Escuela De Doctorado Internacional De La Universidad De Santiago De Compostela.
- Ferrer-Gallego R., Hernández-Hierro J.M., Rivas-Gonzalo J.C., Escribano-Bailón M.T., 2012. Influence of climatic conditions on the phenolic composition of *Vitis vinifera* L. cv. Graciano. *Anal. Chim. Acta*, **732**, 73–77.
- Fraga H., Malheiro A.C., Moutinho-Pereira J., Santos J.A., 2014. Climate factors driving wine production in the Portuguese Minho region. *Agric. For. Meteorol.*, **185**, 26–36.
- Gil P.M., Saavedra J., Schaffer B., Navarro R., Fuentealba C., Minoletti F., 2014. Quantifying effects of irrigation and soil water content on electrical potentials in grapevines (*Vitis vinifera*) using multivariate statistical methods. *Sci. Hortic.* (Amsterdam), **173**, 71–78.
- Girona J., Marsal J., Mata M., Del Campo J., Basile B., 2009. Phenological sensitivity of berry growth and composition of tempranillo grapevines (*Vitis vinifera* L.) to water stress. *Aust. J. Grape Wine Res.*, **15**, 268–277.
- Greer D.H., 2017. Responses of biomass accumulation, photosynthesis and the net carbon budget to high canopy temperatures of *Vitis vinifera* L. cv. Semillon vines grown in field conditions. *Environ. Exp. Bot.*, **138**, 10–20.
- Gupta A., Rico-Medina A., Caño-Delgado A.I., 2020. The physiology of plant responses to drought. *Science*, **368**, 266–269.

- Huglin P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus l'Académie d'Agriculture de France*, **64**, 1117–1126.
- Intrigliolo D.S., Castel J.R., 2009. Response of *Vitis vinifera* cv. "Tempranillo" to partial rootzone drying in the field: Water relations, growth, yield and fruit and wine quality. *Agric. Water Manag.*, **96**, 282–292.
- Junquera P., Lissarrague J.R., Jiménez L., Linares R., Baeza P., 2012. Long-term effects of different irrigation strategies on yield components, vine vigour, and grape composition in cv. Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera* L.). *Irrig. Sci.*, **30**, 351–361.
- Kizildeniz T., Mekni I., Santesteban H., Pascual I., Morales F., Irigoyen J.J., 2015. Effects of climate change including elevated CO₂ concentration, temperature and water deficit on growth, water status, and yield quality of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Agric. Water Manag.*, **159**, 155–164.
- Kottke M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Zeitschrift*, **15**, 259–263.
- Leeuwen V., Tregoaat O., Choné X., Bois B., Pernet D., Gaudillère J.P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin* **43**, 121–134.
- Ma X., Han F., Wu J., Ma Y., Jacoby P.W., 2023. Optimizing crop water productivity and altering root distribution of Chardonnay grapevine (*Vitis vinifera* L.) in a silt loam soil through direct root-zone deficit irrigation. *Agric. Water Manag.*, **277**, 108072.
- Martínez E.M., Rey B.J., Fandiño M., Cancela J.J., 2013. Comparison of two techniques for measuring leaf water potential in *Vitis vinifera* var. Albariño. *Ciência Téc. Vitiv.*, **28**, 29–41.
- Miras-Avalos J.M., Araujo E.S., 2021. Optimization of vineyard water management: Challenges, strategies, and perspectives. *Water* (Switzerland), **13**, 746.
- Mirás-Avalos J.M., Trigo-Córdoba E., Bouzas-Cid Y., Orriols-Fernández I., 2016. Irrigation effects on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. "Albarino" under the humid climate of Galicia. *OENO One*, **50**, 183–194.
- Morabito C., Orozco J., Tonel G., Cavalletto S., Meloni G.R., Schubert A., Gullino M.L., Zwieniecki M.A., Secchi F., 2022. Do the ends justify the means? Impact of drought progression rate on stress response and recovery in *Vitis vinifera*. *Physiol. Plant*, **174**, e13590.
- Munitz S., Netzer Y., Schwartz A., 2017. Sustained and regulated deficit irrigation of field-grown Merlot grapevines. *Aust. J. Grape Wine Res.*, **23**, 87–94.
- Munitz S., Netzer Y., Shtein I., Schwartz A., 2018. Water availability dynamics have long-term effects on mature stem structure in *Vitis vinifera*. *Am. J. Bot.*, **105**, 1443–1452.
- Oliveira A.F., Mameli M.G., Pau L., Satta D., Nieddu G., 2013. Deficit irrigation strategies in *Vitis vinifera* L. cv. Cannonau under mediterranean climate. Part II - cluster microclimate and anthocyanin accumulation patterns. *South African J. Enol. Vitic.*, **34**, 184–195.
- Oliveira M., Cunha M., 2015. Study of the Portuguese populations of powdery mildew fungus from diverse grapevine cultivars (*Vitis vinifera*). *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin*, **49**, 173–182.
- Oliveira M.J.R.A., Castro S., Paltrinieri S., Bertaccini A., Sottomayor M., Santos C.S., Vasconcelos M.W., Carvalho S.M.P., 2020. "Flavescence dorée" impacts growth, productivity and ultrastructure of *Vitis vinifera* plants in Portuguese "Vinhos Verdes" region. *Sci. Hortic.* (Amsterdam), **261**, 108742.
- Olivo N., Girona J., Marsal J., 2009. Seasonal sensitivity of stem water potential to vapour pressure deficit in grapevine. *Irrig. Sci.*, **27**, 175–182.
- Paço T.A., Paredes P., Pereira L.S., Silvestre J., Santos F.L., 2019. Crop coefficients and transpiration of a super intensive Arbequina olive orchard using the dual Kc approach and the Kcb computation with the fraction of ground cover and height. *Water* (Switzerland), **11**, 383.
- Paredes P., Rodrigues G.C., Cameira M. R., Torres M.O., Pereira L.S., 2017. Assessing yield, water productivity and farm economic returns of malt barley as influenced by the sowing dates and supplemental irrigation. *Agric. Water Manag.*, **179**, 132–143.
- Parker A.K., García de Cortázar-Atauri I., Gény L., Spring J.L., Destrac A., Schultz H., Molitor D., Lacombe T., Graça A., Monamy C., 2020. Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars. *For. Meteorol.*, **285–286**, 107902.
- Pellegrino A., Lebon E., Voltz M., Wery J., 2005. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant Soil*, **266**:129–142.
- Phogat V., Skewes M.A., McCarthy M.G., Cox J.W., Šimunek J., Petrie P.R., 2017. Evaluation of crop coefficients, water productivity, and water balance components for wine grapes irrigated at different deficit levels by a sub-surface drip. *Agric. Water Manag.*, **180**, 22–34.
- Pou A., Gulías J., Moreno M., Tomás M., Medrano H., Cifre J., 2011. Cover cropping in *Vitis vinifera* L. cv. Manto Negro vineyards under Mediterranean conditions: Effects on plant vigour, yield and grape quality. *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin*, **45**, 223–234.
- Prada J., Dinis L.T., Soriato E., Vandelle E., Soletkin O., Uysal Ş., Dihazi A., Santos C., Santos J.A., 2024. Climate change impact on Mediterranean viticultural regions and site-specific climate risk-reduction strategies. *Springer Netherlands*, **29**, 52.
- Puig-Sirera À., Rallo G., Paredes P., Paço T.A., Minacapilli M., Provenzano G., Pereira L.S., 2021. Transpiration and water use of an irrigated traditional olive grove with sap-flow observations and the FAO56 dual crop coefficient approach. *Water* (Switzerland), **13**, 2466.
- Romero P., Botía P., Morote E., Navarro J.M., 2024. Optimizing deficit irrigation in Monastrell vines grafted on rootstocks of different vigour under semi-arid conditions. *Agric. Water Manag.*, **292**, 108669.
- Romero P., García García J., Fernández-Fernández J.I., Muñoz R.G., Amor Saavedra F., Martínez-Cutillas A., 2016. Improving berry and wine quality attributes and vineyard economic efficiency by long-term deficit irrigation practices under semiarid conditions. *Sci. Hortic.*, **203**, 69–85.
- Rosa R.D., Paredes P., Rodrigues G.C., Alves I., Fernando R.M., Pereira L.S., Allen R.G., 2012. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agric. Water Manag.*, **103**, 8–24.
- Ruano-Rosa D., Sánchez-Hernández E., Baquero-Foz R., Martín-Ramos P., Martín-Gil J., Torres-Sánchez S., Casanova-Gascón J., 2022. Chitosan-Based Bioactive Formulations for the Control of Powdery Mildew in Viticulture. *Agronomy*, **12**, 495.
- Santesteban L.G., Miranda C., Royo J.B., 2011. Suitability of pre-dawn and stem water potential as indicators of vineyard water status in cv. Tempranillo. *Aust. J. Grape Wine Res.*, **17**, 43–51.
- Santesteban L.G., Miranda C., Marín D., Sesma B., Intrigliolo D.S., Mirás-Avalos J.M., Escalona J.M., Montoro A., Herralde F., Baeza P., et al. 2019. Discrimination ability of leaf and stem water potential at different times of the day

- through a meta-analysis in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.*, **221**, 202–210.
- Schultz H.R., 2016. Global Climate Change, Sustainability, and Some Challenges for Grape and Wine Production. *J. Wine Econ.*, **11**, 181–200.
- Seljaninov G.T., 1966. *Agroclimatic Map of the World*. Hydrometeoizdat Publishing House, Leningrad.
- Shellie K.C., 2014. Water productivity, yield, and berry composition in sustained versus regulated deficit irrigation of merlot grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.*, **65**, 197–205.
- Silva J.N., Ponciano N.J., Souza C.L.M., Souza P.M., Viana L. H., Silva M.G.M., 2021a. Economic viability of ‘Niágara Rosada’ grape production in the north and northwest regions of Rio de Janeiro. *Ver. Bras. Frutic.*, **43**, e-672.
- Silva S.P., Valín M.I., Mendes S., Araujo-Paredes C., Cancela J.J., 2021b. Dual crop coefficient approach in *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro. *Agronomy*, **11**, 2062.
- Silva S.P., Valín M.I., Mendes S., Araujo-Paredes C., Cancela J.J., 2024. Water productivity in *Vitis vinifera* L. cv. Alvarinho using dual crop coefficient approach. *Agric. Water Manag.* **303**, 109027.
- Smith D.M., Scaife A.A., Eade R., Athanasiadis P., Bellucci A., Bethke I., Bilbao R., Borchert L.F., Caron L.P., Counillon F., 2020. North Atlantic climate far more predictable than models imply. *Nature*, **583**, 796–800.
- Strack T., Stoll M., 2022. Soil water dynamics and drought stress response of *Vitis vinifera* L. in steep slope vineyard systems. *Agric. Water Manag.*, **274**, 107967.
- Tonietto J., 1999. Les macroclimats viticoles mondiaux et l’influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France: méthodologie de caractérisation. 233 p. PhD Thesis. Ecole Nationale Supérieure Agronomique De Montpellier.
- Trenti M., Lorenzi S., Bianchedi P.L., Grossi D., Failla O., Grando M.S., Emanuelli F., 2021. Candidate genes and SNPs associated with stomatal conductance under drought stress in *Vitis*. *BMC Plant Biol.*, **21**, 7.
- Trigo-Córdoba E., Bouzas-Cid Y., Orriols-Fernández I., Mirás-Avalos J.M., 2015. Effects of deficit irrigation on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. “Godello” and “Treixadura” in Ribeiro, NW Spain. *Agric. Water Manag.*, **161**, 20–30.
- Tuccio L., Lo Piccolo E., Battelli R., Matteoli S., Massai R., Scalabrelli G., Remorini D., 2019. Physiological indicators to assess water status in potted grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Sci. Hortic.* (Amsterdam), **255**, 8–13.
- Vélez S., Rubio J.A., Andrés M.I., Barajas E., 2019. Agronomic classification between vineyards (‘Verdejo’) using NDVI and Sentinel-2 and evaluation of their wines. *Vitis J. Grapevine Res.*, **58**, 33–38.
- Vilanova M., Rodríguez-Nogales J.M., Vila-Crespo J., Yuste J., 2019. Influence of water regime on yield components, must composition and wine volatile compounds of *Vitis vinifera* cv. Verdejo. *Aust. J. Grape Wine Res.*, **25**, 83–91.
- Wagner M., Stanbury P., Dietrich T., Döring J., Ewert J., Foerster C., Freund M., Friedel M., Kammann C., Koch M., 2023. Developing a Sustainability Vision for the Global Wine Industry. *Sustain.*, **15**, 10487.
- Williams L.E., Baeza P., 2007. Relationships among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.*, **58**, 173–181.
- Wilson T.G., Kustas W.P., Alfieri J.G., Anderson M.C., Gao F., Prueger J.H., McKee L.G., Alsina M.M., Sanchez L.A., Alstad K.P., 2020. Relationships between soil water content, evapotranspiration, and irrigation measurements in a California drip-irrigated Pinot noir vineyard. *Agric. Water Manag.*, **237**, 106186.
- Winkler A.J., Cook J.A., Kliever W.M., Lider L.A., 1974. *General Viticulture*. 710p. University of California Press, California.
- WRB., 2014. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports, 106.
- Zamorano D., Franck N., Pastenes C., Wallberg B., Garrido M., Silva H., 2021. Improved physiological performance in grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. Cabernet Sauvignon facing recurrent drought stress. *Aust. J. Grape Wine Res.*, **27**, 258–268.
- Zia S., Spohrer K., Merkt N., Wenyong D., He X., Müller J., 2009. Non-invasive water status detection in grapevine (*Vitis vinifera* L.) by thermography. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, **2**:46–54.
- Zufferey V., Verdenal T., Dienes A., Belcher S., Lorenzini F., Koestel C., Blackford M., Bourdin G., Gindro K., Spangenberg J.E., 2020. The influence of vine water regime on the leaf gas exchange, berry composition and wine quality of Arvine grapes in Switzerland. *OENO One*, **54**, 553–568.

5 DISCUSSÃO

5.1 DESENHO EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO METODOLÓGICA

Os artigos apresentados referem estudos realizados com os cultivares Loureiro (capítulo 4.1 e 4.3) e Alvarinho (capítulo 4.2) da espécie *Vitis vinifera* L. Os estudos tiveram como objetivo quantificar os efeitos de diferentes estratégias de rega na fisiologia da videira, no balanço hídrico do solo, no desempenho produtivo da videira e na qualidade do mosto em condições climáticas atlânticas. As experiências foram estruturadas utilizando um delineamento que incorporava três estratégias de rega distintas: rega total (FI ou I), rega deficitária (DI) e sequeiro (R), cada uma replicada quatro vezes. Este desenho, facilita análises comparativas entre uma variedade de regimes de gestão de água, tendo em conta a variabilidade espacial inerente às características dos ambientes vitícolas (Shellie, 2014; Cancela et al., 2016; Zarrouk et al., 2016).

O calendário de rega foi estabelecido em função da água disponível para o viticultor, mas de forma a cumprir os tratamentos pré-estabelecidos. Além disso, foi monitorizado o teor de água do solo, utilizando-se uma sonda capacitiva (Diviner 2000®) em intervalos de 10 cm até 80 cm de profundidade, fornecendo assim um perfil temporal e vertical do teor de água do solo. O teor de água do solo, foi utilizado para a calibração e validação do modelo SIMDualKc (Rosa et al., 2012a; Paço et al., 2019).

A experiência com o cultivar Loureiro foi realizada durante quatro ciclos culturais consecutivos (2019-2022) (capítulo 4.3), enquanto o ensaio com o cultivar Alvarinho compreendeu dois ciclos culturais (2018-2019) (capítulo 4.2). Para culturas perenes como a *Vitis vinifera*, estudos de longo prazo são fundamentais, dada a influência significativa da variabilidade climática entre anos no desenvolvimento fenológico, uso da água e avaliação da produtividade (Herrera et al. 2015, Pagay e Collins 2017, Romero et al. 2024). O delineamento experimental utilizado nestes trabalhos é, portanto, usado para analisar de forma abrangente os efeitos sazonais e as interações entre os tratamentos, aumentando assim a robustez dos resultados. As tendências observadas entre ciclos culturais, tais como a produtividade da água superior dos tratamentos DI, revelam a importância da experimentação de campo com vários ciclos culturais (Phogat et al., 2017; Wohlfahrt et al., 2018).

Uma inovação metodológica no estudo destes cultivares (Loureiro e Alvarinho) consistiu na caracterização clara da cobertura vegetal ativa (AGC) e na sua incorporação na modelação do balanço hídrico do solo. A densidade e a altura da cobertura vegetal ativa, tanto na linha da cultura como na entrelinha, foram monitorizadas ao longo dos ciclos culturais e posteriormente incluídas no modelo SIMDualKc, como uma componente separada do coeficiente cultural basal (K_{cb}). Este coeficiente apresenta uma funcionalidade dupla, separando eficazmente a transpiração da videira e a evapotranspiração da AGC. Este procedimento facilita uma simulação mais precisa do uso da água na vinha em condições climáticas atlânticas, onde é recorrente existir vegetação espontânea ou semeada (Pereira et al. 2015, Rallo et al. 2021), tal como verificado nos três estudos apresentados.

Os dados climáticos foram recolhidos a partir de uma estação meteorológica instalada em cada uma das parcelas de estudo. A recolha de dados diários, como a temperatura do ar, humidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e precipitação, foi essencial para calcular a evapotranspiração de referência (ET_0) utilizando a equação FAO Penman-Monteith (Allen

1996, Allen et al. 1998). A recolha destes dados garante por um lado a representatividade espacial e temporal do microclima real das vinhas em estudo. Por outro lado, a inclusão destes dados no modelo SIMDualKc permitiu o ajuste dos coeficientes culturais e das taxas de evaporação do solo às reais condições verificadas em cada parcela, que são altamente sensíveis às flutuações climáticas de curto prazo, particularmente nas condições atlânticas caracterizadas por eventos frequentes de precipitação e radiação solar variável (Di Carlo et al. 2019, Smith et al. 2020)

5.2 GESTÃO DA ÁGUA E IMPACTOS CLIMÁTICOS NOS CULTIVARES LOUREIRO E ALVARINHO

O setor vitivinícola nas regiões atlânticas, particularmente no noroeste de Portugal, tem vindo a ser progressivamente condicionado pela crescente variabilidade climática, impactos que intensificar-se-ão no futuro, de acordo com as previsões associadas às alterações climáticas (Fraga et al. 2017, Wunderlich et al. 2023). A variabilidade climática, particularmente as alterações na temperatura, nos padrões de precipitação e na evapotranspiração, exerce uma influência substancial na fenologia, produtividade e eficiência do uso da água (WUE) das videiras (Chaves et al. 2010, Vercesi et al. 2024). Os presentes estudos analisam os cultivares Loureiro e Alvarinho de *Vitis vinifera* L., destacando o papel da gestão da rega e da monitorização do balanço hídrico do solo como elementos essenciais na mitigação das pressões climáticas e na promoção da sustentabilidade vitícola. Preocupações semelhantes são apresentadas por Cancela et al. (2016), sublinhando a necessidade de implementação de estratégias de rega precisas face à variabilidade climática.

O clima da região estudada é classificado como Csb, de acordo com o sistema de Köppen-Geiger (Kottek et al. 2006), caracterizado por temperaturas amenas e alta pluviosidade concentrada nos meses de inverno (Fraga et al. 2014). Os dados meteorológicos recolhidos nas estações meteorológicas demonstram um padrão sazonal de evapotranspiração de referência (ET_0), com valores máximos a ocorrerem no verão e valores mínimos a ocorrerem no inverno, refletindo assim o padrão climático natural da região atlântica. Esta variação ao longo do ano pode ser observada no artigo do capítulo 4.2 (cv. Alvarinho), onde os valores de ET_0 variaram entre 1,1 a 8,1 mm dia⁻¹ e 1,5 a 7,0 mm dia⁻¹ em 2018 e 2019, respetivamente. As diferenças entre anos foram mais evidentes no cv. Loureiro (capítulo 4.3), onde a evapotranspiração de referência anual variou de 653 a 865 mm e a precipitação anual acumulada variou significativamente entre os anos, de um mínimo de 733 mm em 2020 a um máximo de 1645 mm em 2022. Conclui-se assim, que há uma variabilidade significativa entre anos, influenciada principalmente pela temperatura do ar, precipitação, velocidade do vento e radiação solar. Estas variações climáticas entre os anos já são conhecidas, contudo de acordo com as projeções estas oscilações tornar-se-ão ainda mais pronunciadas no futuro, uma vez que os cenários do IPCC sugerem um aumento na frequência e intensidade dos eventos extremos, uma redução na precipitação e um aumento nas temperaturas médias (Fonseca et al. 2023).

Os cenários RCP 4.5 e 8.5 (IPCC) indicam um aquecimento significativo e um aumento da aridez no norte de Portugal. As projeções indicam que, mesmo no cenário moderado (RCP2.6), haverá um aumento na temperatura média anual de +1 a 2 °C em comparação com o período histórico, com algumas áreas potencialmente a registar temperaturas superiores a +6 °C até 2100, no cenário RCP8.5. É evidente que os eventos de calor extremo, definidos como dias com temperaturas superiores a 45 °C, aumentaram tanto em frequência como em intensidade. Simultaneamente, tem havido um aumento notável na ocorrência de eventos de elevada precipitação. Por outro lado, prevê-se uma diminuição da precipitação anual. Sob o cenário RCP8.5, projetam-se uma diminuição da precipitação superior a 40% até ao final do século, em comparação com as condições climáticas históricas (Lima et al. 2023, Soares et al. 2022). Estas alterações exigirão ajustes na gestão da água, especialmente tendo em conta que as videiras nesta região atlântica têm sido tradicionalmente cultivadas em sequeiro, (capítulos 4.1, 4.2 e 4.3). No entanto, as alterações climáticas já impulsionam a adoção gradual de práticas de rega para compensar a menor disponibilidade de água no solo e mitigar o stress hídrico nas plantas.

As condições meteorológicas influenciam a fenologia da videira, particularmente nos momentos da floração e da colheita das uvas (vindima). Neste sentido, é benéfico utilizar índices bioclimáticos com o objetivo de caracterizar globalmente os anos (Massano et al. 2023).

A aplicação de índices bioclimáticos, incluindo o Índice de Winkler (WI) (Winkler et al. 1974), o Índice de Huglin (HI) (Huglin 1978), o Índice de Noites Frias (CI) (Tonietto 1999), o Índice de Seljaninov (SI) (Seljaninov 1966) e Índice de Branás (BI) (Branas et al. 1946), foram utilizados para caracterizar o clima, bem como os níveis de stress ao longo dos ciclos culturais. Entre 2018 e 2022, os índices bioclimáticos no cultivar Loureiro (capítulo 4.3) indicaram um clima moderadamente quente, com o índice de Winkler a colocar o local na Região II-III (Winkler et al. 1974) e os valores de Huglin a confirmarem uma classificação de clima temperado quente. As temperaturas noturnas frescas (14,2–16,0 °C) são propícias à preservação aromática, enquanto os índices de Seljaninov e Branás indicaram uma elevada variabilidade climática entre anos. Por outro lado, no ensaio com o cv. Alvarinho (2018–2019) obtiveram-se índices Winkler e Huglin ligeiramente elevados, indicativos de um microclima em aquecimento. Este foi caracterizado por índices notáveis de noites frias (>14 °C) e stress hídrico pronunciado em 2019, como evidenciado pela baixa precipitação e consequente redução do estado hídrico das videiras.

A gestão eficiente da rega é uma estratégia fundamental para mitigar o impacto das alterações climáticas (El-Nashar e Elyamany 2023, Khadatkhar et al. 2025). Neste enquadramento, a adoção de modelos baseados na metodologia dos coeficientes culturais duais tem-se tornado imperativa (Paredes et al. 2018, Wei et al. 2015). Essa abordagem dos coeficientes culturais duais (Dual Kc) surgiu como uma ferramenta para estimar a evapotranspiração da cultura real ($ET_{c\ act}$), separando as contribuições da transpiração da videira, da cobertura vegetal ativa e da evaporação do solo (Allen et al. 1998).

A utilização de modelos como o SIMDualKc facilita a estimativa e a aplicação dos coeficientes culturais duais no balanço hídrico do solo, contribuindo assim para a otimização dos programas de rega e o aumento da produtividade da água (Rosa et al. 2012a, 2012b). No entanto, é importante destacar que existem outros modelos que ajudam a simular os níveis de água no solo, como o modelo SALTMED (El-Sadek 2014, Ragab 2002) e o modelo AquaCrop (Er-Raki et al. 2021, González Perea et al. 2018).

Como um dos objetivos era determinar o impacto do teor de água do solo no desenvolvimento das plantas, foram testadas três estratégias de rega nos dois cultivares. Os estudos com os cultivares Loureiro e Alvarinho (capítulos 4.1, 4.2 e 4.3), incluíram rega total (FI ou I), rega deficitária (DI) e sequeiro (R), com o objetivo de responder às hipóteses e objetivos propostos no capítulo 2. Conforme demonstrado nos capítulos 4.2 e 4.3, a estratégia DI apresentou uma tendência consistente de desempenho superior no que respeita ao uso da água, apresentando incrementos de +0,15 e +0,38 kg de uvas por m³ de água utilizada quando comparada com a estratégia R, em 2018 e 2019, respetivamente, para o cv. Alvarinho (capítulo 4.2). Estes resultados servem para sublinhar a importância da utilização moderada de água para suprir as condições de stress. De forma semelhante, o cultivar Loureiro (capítulo 4.3) evidenciou maior estabilidade produtiva a longo prazo e produtividades da água satisfatórias com a implementação do tratamento DI. Os resultados vão ao encontro da hipótese que a aplicação criteriosa da rega pode servir para mitigar a variabilidade do rendimento e aumentar a sustentabilidade na produção da *Vitis vinifera* em condições atlânticas (Daler 2024, Martínez-Moreno et al. 2023).

Para reforçar esta hipótese, as conclusões registadas com quatro ciclos culturais sucessivos realizados entre 2019 e 2022 (capítulo 4.3) demonstraram que a rega teve um impacto significativo tanto no rendimento como na qualidade do mosto. O rendimento mais elevado foi observado em 2020 em condições de sequeiro ($19\,766,5\text{ kg ha}^{-1}$) enquanto o rendimento mais baixo ocorreu em 2021 em condições de rega total ($4\,726,1\text{ kg ha}^{-1}$). Estes resultados evidenciam a complexa interação entre rega, clima e condições sazonais. Apesar de flutuações ocasionais, a DI demonstrou uma produtividade da água consistente, reforçando assim o seu papel como estratégia de rega que apresenta resiliência às alterações climáticas.

5.3 IMPACTO DO SOLO E DA COBERTURA NO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

A classificação dos solos e o conhecimento das suas características são fundamentais na disponibilidade de água e no desempenho das vinhas, especialmente em condições de instabilidade climática e stress hídrico (Aloui et al. 2023). As parcelas avaliadas nos trabalhos referidos nos capítulos 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam textura franco-arenosa, caracterizada por um elevado teor de areia (aproximadamente 70%), com as frações de limo e argila a contribuírem significativamente para a sua capacidade de retenção de água (capítulos 4.1, 4.2 e 4.3). Os solos destas parcelas são classificados como regossolos eutrícos (WRB 2014), caracterizados por teores de matéria orgânica que variam entre 1,74% e 1,95%. Estes valores de matéria orgânica contribuem para a estrutura e a capacidade de retenção de humidade do solo (Núñez e Schipanski 2023). Apesar da sua textura relativamente grossa, estes solos revelaram-se capazes de manter valores de água disponível total na zona radicular (TAW) entre 100 mm e 112,8 mm, para uma profundidade radicular da vinha de 0,8 metros.

Os valores de capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento foram determinados por extrações com placa de pressão a -33 kPa e -1500 kPa, respetivamente (Veihmeyer and Hendrickson, 1949). Os resultados obtidos em ambas as parcelas de estudo foram semelhantes, com valores de capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento de $0,281 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,140 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (cv. Alvarinho, capítulo 4.2) e $0,251 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,121 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (cv. Loureiro, capítulos 4.1 e 4.3). Verificou-se que os parâmetros hídricos variaram ao longo dos perfis do solo, pelo que foi necessário considerar os valores de capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento nas diferentes profundidades do solo, pois os modelos de balanço hídrico do solo como o modelo SIMDualKc possibilitam a inclusão destas propriedades do solo (Paredes et al. 2017, Rosa et al. 2012a). Por outro lado, para melhor caracterizar o solo, as leituras do teor de água serviram para calibrar a curva de esgotamento do modelo, utilizando o método de regressão potencial (Liu et al. 2006), aplicando parâmetros empíricos de drenagem. Esta modelação é importante para caracterizar o balanço hídrico do solo após a precipitação e facilitar a análise da interação entre a textura do solo, a profundidade das raízes e o teor de água do solo (Stevens e Harvey 1996). Em climas marcados por precipitação concentrada no inverno e períodos frequentes de seca no verão (Fraga et al. 2014), conforme documentado no presente estudo, a correta identificação desses aspetos relacionados com o solo é de extrema importância.

A cobertura vegetal ativa (AGC) também é um fator a considerar e que deve ser incorporado no balanço hídrico do solo. Em todas as parcelas experimentais, observou-se vegetação espontânea, principalmente da família *Poaceae*, ao longo do ciclo cultural, com densidades e alturas variáveis, dependendo da frequência de corte e das práticas de gestão, conforme explicado nos capítulos 4.1, 4.2 e 4.3. No estudo do cv. Alvarinho (capítulo 4.2) a densidade oscilou entre 50 % e 95 % nas entrelinhas e entre 10 % e 90 % nas linhas. A altura da cobertura vegetal ativa também variou, entre 0,05 m e 0,20 m nas entrelinhas e entre 0,03 m e 0,18 m nas linhas. Já no estudo com o cv. Loureiro (capítulo 4.1) a altura verificada na entrelinha variou entre 0,05 m e 0,20 m com densidades que variaram entre 10 % e 90 %, e a densidade nas linhas variou entre 0 % e 15%. A presença da AGC funcionou não só como concorrente pela água do solo, mas também como prestadora de serviços de ecossistema, contribuindo para o seguinte: (i) controlo da erosão, (ii) sequestro de carbono, (iii) fixação de azoto e (iv) controlo biológico de pragas (Garcia et al. 2018, Oliveira e Cunha 2015, Ruano-Rosa et al. 2022). No entanto, é imperativo incluir as necessidades de água da AGC na evapotranspiração total da cultura, particularmente quando se emprega a dos coeficientes culturais duais (Fandiño 2021, Fandiño et al. 2012).

O coeficiente basal da cobertura vegetal ativa (K_{cb_cover}) apresentou variações ao longo do ciclo cultural e entre ciclos culturais em ambas as cultivares variando entre 0.17 e 0.27 no cv.

Loureiro (capítulo 4.1) e 0.16 e 0.31 no cv. Alvarinho (capítulo 4.2). Esses valores dependeram do desenvolvimento fenológico das videiras, bem como altura e densidade da cobertura vegetal ativa na linha e na entrelinha (capítulo 4.1). Essa variabilidade requer resolução temporal na estimativa dos coeficientes para evitar subestimar ou superestimar as necessidades hídricas. Conforme documentado no capítulo 4.1, embora às vezes marginal, a evapotranspiração AGC assume relevância em cenários de rega deficitária (DI). Nesses cenários, a água absorvida pelas videiras é reduzida, com o resultado de que a evaporação do solo representa uma fração maior da ET_c . Apesar do modelo fazer essa separação, alguns autores já relataram inconsistências nessa divisão, referindo-se ao facto de que a maior parte da ET_c deve estar associada à cultura em produção e não à cobertura vegetal ativa (Fandiño 2021).

A quantificação destes componentes utilizando o modelo SIMDualKc permitiu a divisão das componentes da evapotranspiração entre a transpiração da videira e os processos associados à AGC. O papel ecológico da AGC na redução da temperatura do solo e na manutenção da estrutura do solo pode compensar os seus efeitos competitivos em certos sistemas vitícolas, especialmente quando a disponibilidade de água não é criticamente limitante (Acevedo-Opazo et al. 2010, Pereira et al. 2020). Além disso, sabe-se que mesmo quando a AGC causa ligeiras reduções na água disponível no solo (ASW), a sua integração em sistemas vitícolas sustentáveis continua a ser benéfica, desde que a gestão da rega tenha em conta a sua presença (Garcia et al. 2018).

A variabilidade espacial do solo também foi abordada utilizando métodos geoestatísticos. Por exemplo, no estudo realizado com o cv. Alvarinho (capítulo 4.2), a condutividade elétrica aparente (EC_a) foi medida em toda a área experimental utilizando o equipamento EM38-DD (Geonics, Canada). Isto facilitou o mapeamento da heterogeneidade do solo e permitiu a instalação mais precisa de sondas de monitorização e dos blocos de tratamento (Mirás-Avalos et al. 2020). Esta abordagem facilitou o isolamento e a garantia da homogeneidade do solo entre tratamentos, considerando apenas as variações nos tratamentos de rega e o seu impacto na variabilidade do teor de água do solo. Esta metodologia pode ser empregada para a identificação nas parcelas dos setores de rega, cada um com necessidades hídricas diferentes (Hedley e Yule 2009).

A inclusão da caracterização física do solo, a avaliação da cobertura vegetal ativa (AGC) e a monitorização do teor de água do solo com base em sondas capacitivas foram fundamentais para a calibração precisa do modelo SIMDualKc. Esta abordagem permitiu ainda uma interpretação precisa das respostas da vinha à variabilidade climática registada entre os ciclos culturais bem como clarificou que a implementação estratégia de rega DI a melhora a eficiência do uso da água, mantendo simultaneamente o rendimento das uvas e a qualidade do mosto.

5.4 MODELAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO COM SIMDUALKc

O modelo SIMDualKc baseia-se na abordagem dos coeficientes culturais duais (Allen et al. 1998). Esta abordagem foi desenvolvida para melhorar as estimativas da evapotranspiração da cultura real, dividindo-a em dois componentes distintos: a transpiração basal das culturas e a evaporação da superfície do solo. Esta metodologia representa um avanço em relação à abordagem convencional do coeficiente cultural, que é incapaz de diferenciar estes processos. A abordagem dos coeficientes culturais duais fornece uma estimativa mais precisa das necessidades hídricas de culturas com copas complexas e condições de cobertura vegetal ativa variáveis, como vinhas, onde a vegetação de cobertura vegetal ativa e o solo nu coexistem e variam sazonalmente (Allen et al. 1998, Petry et al. 2023, Rallo et al. 2021).

O presente estudo apresenta a adoção do SIMDualKc no estudo de *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro e cv. Alvarinho (capítulos 4.1 e 4.2), identificadas como castas adequadas para as condições vitícolas atlânticas, onde o clima, a cobertura vegetal ativa e a densidade das plantas são variáveis. A calibração do modelo, foi elaborada com os dados do teor de água no solo do tratamento de sequeiro do primeiro ano. A posterior validação do modelo foi realizada com os teores de água no solo dos restantes tratamentos e em anos subsequentes, obtendo-se uma correlação elevada entre o teor de água no solo simulada com o modelo e o teor de água no solo obtido *in situ*. Por exemplo, o estudo com o cultivar Alvarinho (capítulo 4.2) apresentou uma correlação quase perfeita ($r^2 = 0,995$) entre o teor de água no solo observada *in situ* e simulada com recurso ao SIMDualKc, demonstrando assim a capacidade do modelo para capturar variações no equilíbrio hídrico sob diferentes estratégias de rega. Além disso, a capacidade do modelo SIMDualKc de distinguir a transpiração da videira e a evapotranspiração da cobertura vegetal ativa permitiu identificar as contribuições específicas das estratégias de rega deficitária para o aumento da produtividade da água (WP) e da eficiência do uso da água pelas culturas (WUE), que são métricas importantes para avaliar o desempenho no uso da água (Fatichi et al. 2023, Fernández 2023).

A pertinência da utilização do SIMDualKc nessas investigações é evidenciada, não apenas pela sua precisão preditiva, mas também pela sua aplicabilidade prática para a gestão sustentável da rega. Conforme descrito no capítulo 4.1, o modelo tem capacidade de incorporar dados de diferentes fases fenológicas, o que o torna particularmente adequado para a avaliação das repercussões de diversas estratégias de rega em diferentes tipos de culturas.

No contexto das alterações climáticas, em que se prevê uma diminuição da precipitação e um aumento da evapotranspiração na Região dos Vinhos Verdes (Fraga et al. 2016, Guedes et al. 2024, Jones e Alves 2012), o modelo serve como uma ferramenta de apoio à decisão para os viticultores que procuram adaptar-se sem comprometer a qualidade das uvas ou a viabilidade económica. Além disso, a comparação de dados de campo baseados em sensores (por exemplo, sondas capacitivas) com simulações SIMDualKc aumenta a confiabilidade das recomendações de rega (Paredes et al. 2018). Essencialmente, o modelo SIMDualKc fornece uma solução cientificamente fundamentada, calibrada localmente e implementável para a viticultura em ambientes com restrições hídricas (Ma et al. 2023, Pereira et al. 2020, Shellie 2014).

A implementação do SIMDualKc requer procedimentos rigorosos de calibração e validação. Consequentemente, as metodologias de calibração utilizadas nos estudos que utilizam este modelo devem apresentar características comparáveis, conforme descrito nos capítulos 4.1 e 4.2. Um ponto de partida comum foi a calibração inicial utilizando tratamentos de sequeiro (R), em que a ausência de rega minimizou a variabilidade externa da entrada de água (Cancela et al. 2015). Esta estratégia permitiu a simplificação do processo de estimativa de parâmetros, garantindo que o teor de água do solo fosse exclusivamente influenciado pela precipitação e pela absorção de água pelas culturas (capítulos 4.1 e 4.2). A recolha dos dados reais do teor de água no solo foi realizada utilizando sondas capacitivas calibradas (Diviner 2000), que foram instaladas na vertical obtendo-se leituras em intervalos de 10 cm até uma profundidade de 80 cm.

A calibração do modelo foi realizada utilizando dados do tratamento com sequeiro (R), em que a ausência de rega simplifica o balanço hídrico, limitando as entradas de água apenas à precipitação, conforme descrito anteriormente (Cancela et al. 2015, Fandiño 2021, Paredes et al. 2017). Isto permite ao modelo identificar mais claramente os padrões de esgotamento da água impulsionados pela atividade das plantas e validar a precisão das simulações do teor de água do solo (Fandiño et al. 2012). No estudo com o cultivar Alvarinho (capítulo 4.2), a calibração com os dados de 2018 relativos ao sequeiro resultou numa elevada correlação entre a água do solo disponível simulada pelo modelo SIMDualKc e a água do solo disponível observada pela sonda capacitiva ($r^2 = 0,995$). Isto confirmou a capacidade do modelo para simular um balanço hídrico do solo sem a variabilidade induzida pela rega. Um nível comparável de precisão foi obtido na casta Loureiro (capítulo 4.1), validando assim a utilização do modelo SIMDualKc em contextos vitícolas, caracterizados por cobertura vegetal ativa e condições climáticas atlânticas.

Após o processo de calibração, foi realizada a fase de validação. Esta fase utilizou dados de outros tratamentos. Esses tratamentos ao introduzirem diferentes estratégias de rega, desde rega total até rega deficitária, demonstraram a robustez do modelo na previsão do teor de água disponível no solo (Cancela et al. 2015, Puig-Sirera et al. 2021). Verificamos assim que em ambos o estudo a utilização de tratamentos de rega proporcionou uma estrutura prática para testar o desempenho das videiras sob stress hídrico e criou as diferentes condições de água do solo necessárias para calibrar e validar rigorosamente o modelo. O alinhamento dos resultados simulados com as observações da sonda capacitiva em diferentes tratamentos confirmou a robustez e a utilidade do modelo SIMDualKc na orientação das estratégias de rega nas vinhas atlânticas em cenários climáticos atuais e futuros.

Em ambos os estudos, o método de regressão proposto por Liu et al. (2006) foi aplicado para derivar a curva de esgotamento do solo após eventos de precipitação. Os parâmetros «a» (valor de armazenamento do solo) e «b» (exponente da taxa de drenagem) foram ajustados utilizando a curva de Kostiakov (Kostiakov 1932). Esta modelação baseada em regressão permite a extrapolação do comportamento do solo para além do intervalo observado, aumentando assim a capacidade preditiva do modelo SIMDualKc em várias condições de humidade. Além disso nos capítulos 4.1 e 4.2, o número de escoamento CN foi definido em 60, o que pressupõe uma taxa de infiltração típica de solos franco-arenosos (Allen et al. 1998).

Nesse sentido, após a validação, verificou-se que o modelo considera de forma explícita a ET_c e a sua partição entre a transpiração da videira e a evaporação do solo. Ao ajustar os valores de K_{cb} ao longo do ciclo cultural e considerar as contribuições da AGC, o modelo conseguiu estimar a água disponível no solo. Essa capacidade é crucial para a rega de precisão na viticultura, particularmente quando se trata de otimizar estratégias de rega deficitária sem comprometer a qualidade das uvas (Shellie 2014).

Apesar da robustez demonstrada, é importante reconhecer as limitações desta abordagem. Por exemplo, a precisão dos resultados do modelo depende do conhecimento rigoroso da profundidade das raízes e da avaliação fenológica, que foram estimadas visualmente utilizando a escala de Baggiolini (Baggiolini et al. 1993). Além disso, embora o balanço hídrico do solo seja preciso, parece haver uma imprecisão na separação do consumo de água pela AGC e pela cultura (Fandiño, 2021). Apesar destas reservas, a consistência no desempenho do modelo entre cultivares, anos e locais apoia a aplicabilidade mais ampla do SIMDualKc na gestão da água na viticultura atlântica. O desenho modular do modelo e a sua capacidade de interagir com dados de campo derivados de sondagem capacitiva posicionam-no como um instrumento para adaptar a rega das vinhas a novos cenários de clima e stress hídrico.

5.5 INCLUSÃO DO SWP E DO SIMDUALKC NO BALANÇO HÍDRICO

Os parâmetros do potencial hídrico de ramo (SWP), evapotranspiração da cultura real ($ET_{c\ act}$) e transpiração (T) são fatores fisiológicos e hidrológicos interdependentes que, coletivamente, formam a base para a avaliação do estado hídrico da videira, resposta ao stress hídrico e eficiência no uso da água. Estes indicadores foram objeto de monitorização nos estudos com *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro e cv. Alvarinho, onde forneceram informações sobre a eficácia de diferentes estratégias de rega.

O SWP, obtido através de câmara de pressão, é amplamente reconhecido como um dos indicadores fisiológicos mais fiáveis do stress hídrico da videira, refletindo a tensão com que a água é retida no sistema vascular das plantas (Santesteban et al. 2019). Foi demonstrado que é capaz de reportar flutuações de curto prazo na disponibilidade de água e está fortemente relacionado com a humidade do solo na zona radicular (Munitz et al. 2018). Nos estudos apresentados, as leituras do SWP foram classificadas de acordo com limites estabelecidos. Valores de SWP acima de -0,6 MPa indicam ausência de stress, entre -0,6 e -0,9 MPa indicam stress leve, valores acima de -1,1 MPa denotam stress moderado a severo e acima de -1,4 MPa registam a presença de stress severo (Leeuwen et al. 2009, Martínez et al. 2013, Miras-Avalos e Araujo 2021).

No cv. Loureiro, (capítulo 4.3). os valores de SWP caíram frequentemente abaixo de -1,2 MPa durante os meses de verão, particularmente em 2019 e 2022, indicando stress hídrico moderado a severo. No entanto, os tratamentos de rega deficitária (DI) mantiveram os níveis de SWP dentro de uma faixa de menos stress de -0,8 a -1,1 MPa em mais estágios fenológicos. Em contrapartida, o estudo com Alvarinho revelou que os valores de SWP foram geralmente menos negativos em condições de sequeiro, com máximo atingido de -0,66 MPa no meio do ciclo cultural. Estas diferenças podem ser atribuídas a características específicas do cultivar, tais como a regulação estomática e o índice de área foliar, que influenciam o comportamento hidráulico da planta. É importante notar que ambos os estudos confirmam a eficácia da DI na regulação do stress hídrico da videira, preservando simultaneamente a função fisiológica, como evidenciado pelos valores consistentemente mais baixos de SWP nos tratamentos com DI em comparação com os SWP de sequeiro.

A evapotranspiração da cultura real ($ET_{c\ act}$) foi simulada utilizando o modelo SIMDualKc, e permitiu quantificar o consumo total de água da vinha através da soma da transpiração da videira e da evaporação da superfície do solo. Este parâmetro é fundamental para a avaliação da produtividade da água e foi calculado em função da evapotranspiração de referência (ET_0) e do coeficiente da cultura real. Este último foi ajustado diariamente para refletir o stress hídrico do solo utilizando o coeficiente de stress hídrico (Ks) (Allen et al. 1998). Verificou-se que os efeitos da ET_c variam consideravelmente entre cultivares, com diferenças significativas observadas entre tratamentos e ciclos culturais. Valores mais elevados foram registados nos tratamentos com rega total, o que pode ser atribuído ao aumento do desenvolvimento da copa e do maior teor de água no solo. Em contrapartida, valores mais baixos foram observados nos tratamentos com rega deficitária (DI) e sequeiro (R), o que é indicativo de uma redução do teor de água no solo e conseqüentemente de uma atividade fisiológica restrita.

A transpiração representa a água utilizada diretamente em processos fisiológicos, como a fotossíntese e o arrefecimento, sendo uma componente relevante para avaliar a eficiência do uso da água pelas culturas. À medida que a $ET_{c\ act}$ aumentava, impulsionada por temperaturas mais elevadas, radiação solar e velocidade do vento, a transpiração também aumentava, levando a valores mais negativos de SWP quando a humidade do solo era limitante. Nos estudos realizados com os cultivares Loureiro e Alvarinho (capítulos 4.1, 4.2 e 4.3), os períodos de alta $ET_{c\ act}$ corresponderam a taxas elevadas de transpiração nos tratamentos com rega. Por outro lado, as videiras cultivadas em sequeiro apresentaram transpiração reduzida e SWP mais negativo, indicando o fecho dos estomas induzido pelo stress. Portanto, o SWP funciona também como um indicador fisiológico da transpiração (Ohana-Levi et al. 2022, Padgett-Johnson et al. 2003), estabelecendo uma ligação direta entre o clima e a resposta da planta. Neste sentido, a estratégia com rega deficitária resultou em níveis moderados de SWP e taxas de transpiração estáveis, favorecendo o correto desenvolvimento das videiras e evitando stress excessivo ou crescimento vegetativo excessivo.

5.6 COEFICIENTE CULTURAL BASAL NAS CV. LOUREIRO E CV. ALVARINHO

O coeficiente cultural basal (K_{cb}) é um parâmetro fundamental no método dos coeficientes culturais duais (Paço et al. 2019). A estimativa precisa de K_{cb} ao longo do ciclo cultural é fundamental para uma modelação fiável da evapotranspiração da cultura real e para a determinação das necessidades hídricas das culturas. Nestes estudos com os cultivares Loureiro e Alvarinho, os valores de K_{cb} foram determinados por tentativa e erro através da calibração com o teor de água do solo observado confrontado com o teor de água do solo simulado, tal como referido anteriormente.

No cultivar Loureiro (capítulo 4.1), o ajuste ideal do modelo foi alcançado com os valores diferentes de K_{cb} em todas as fases de crescimento: O valor inicial de K_{cb} foi determinado como 0,33, com os valores K_{cb} a meio no final do ciclo cultural estabelecidos em 0,68 e 0,54, respetivamente. O coeficiente cultural basal é indicativo de um desenvolvimento moderado da copa e da influência das condições climáticas atlânticas, onde verões amenos e cobertura vegetal ativa podem limitar a transpiração. O K_{cb} de 0,68 no meio do ciclo cultural é consistente com os valores obtidos em estudos análogos realizados em climas temperados (Paredes et al. 2017, Rosa et al. 2012a), sugerindo que o cv. Loureiro mantém um perfil de transpiração equilibrado durante o desenvolvimento máximo da copa, sem apresentar vigor vegetativo excessivo. Em contrapartida, o estudo do cultivar Alvarinho (capítulo 4.2) sugere valores mais baixos (coeficiente cultural basal de 0,22, 0,53 e 0,24 no início, meio e fim do ciclo cultural, respetivamente). É importante notar que estes são valores mais baixos, mas foram ajustados para refletir o vigor específico e a arquitetura da copa do cultivar.

Uma diferença fundamental entre os cultivares é observada na estrutura das suas copas e na arquitetura espacial das suas condições de crescimento. O cultivar Loureiro (capítulo 4.1) foi conduzido num sistema de cordão simples ascendente, com densidade de 1 666 plantas ha^{-1} , enquanto o cultivar Alvarinho também conduzido em cordão simples ascendente (capítulo 4.2), mas com densidade mais baixa (1 111 plantas ha^{-1}). Estas variações têm impacto na interceção da luz, na circulação do ar e, conseqüentemente, nas taxas de transpiração (Millan et al. 2025). Conseqüentemente, os valores de K_{cb} diferiram não só devido à diferença entre cultivares, mas também devido aos sistemas de condução locais e às variáveis climáticas. Isto enfatiza a necessidade de calibração *in situ* para um conhecimento mais preciso do teor de água no solo.

Em conclusão, embora ambos os cultivares tenham apresentado desenvolvimentos fenológicos análogos e tenham sido cultivadas em condições atlânticas, as variações em K_{cb} foram indicativas de características fisiológicas e de gestão das plantas e da cobertura vegetal ativa diferente. Os resultados destes estudos servem para reforçar a importância de atribuir coeficiente cultural basal específicos para cada cultivar e cada momento do ciclo cultural, particularmente no contexto de sistemas perenes, onde a variabilidade anual e a estrutura da videira exercem uma influência significativa no estado hídrico das culturas (Rahman et al. 2024, Zarrouk et al. 2024).

5.7 PRODUTIVIDADE E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA

A produtividade água (WP) e a eficiência do uso da água (WUE) são indicadores que servem para avaliar estratégias de rega, especialmente no contexto das alterações climáticas e da crescente escassez de água nas regiões vinícolas. O termo WP é normalmente utilizado para designar a relação entre o rendimento das culturas e a quantidade total de água utilizada na produção, enquanto a WUE significa a relação entre o rendimento e o volume de água atualmente consumido pela planta através da transpiração (Fatichi et al. 2023, Romero et al. 2024).

Foi demonstrado, no caso do cv. Loureiro (capítulo 4.3), que a estratégia de rega deficitária (DI) obteve bons desempenhos em termos de produtividade da água, nunca obtendo resultados significativamente inferiores aos outros tratamentos em todos os anos. No estudo do cv. Alvarinho (capítulo 4.2), observou-se a mesma tendência, os dados indicaram que o tratamento de rega deficitária (DI) alcançou valores de produtividade da água de 2.46 kg m^{-3} em 2018 e $1,24 \text{ kg m}^{-3}$ em 2019, superiores aos registados em condições de sequeiro e semelhantes aos obtidos com rega total. Estes resultados estão em concordância com a hipótese que afirma que o stress hídrico moderado pode melhorar os atributos de produtividade bem como a qualidade das uvas (Shellie, 2014; Phogat et al., 2017; Ma et al., 2023).

5.8 RESPOSTA DA VIDEIRA À VARIABILIDADE CLIMÁTICA E ESTRATÉGIAS DE REGA

Os resultados dos estudos demonstraram que a produção e a qualidade da videira apresentavam padrões sazonais consistentes, influenciados por interações complexas entre variáveis climáticas, condições do solo, gestão de rega e características dos cultivares. O presente estudo examinou quatro ciclos culturais de *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro (capítulo 4.3) e dois ciclos culturais de cv Alvarinho (capítulo 4.2). Foram observadas variações no rendimento e na qualidade das uvas em ambas as vinhas entre os ciclos culturais (capítulos 4.2 e 4.3). Essas variações enfatizam o papel que as condições climáticas desempenharam na determinação do desempenho fisiológico das videiras e nos resultados produtivos.

No cv. Loureiro (capítulo 4.3), estudo realizado entre 2019 e 2022, observou-se uma oscilação sazonal pronunciada na produtividade, pois anos com elevada produção são precedidos por anos com valores significativamente mais baixos, similares aos reportados por outros autores na região do Douro (Cunha and Richter, 2012). A maior produtividade foi observada em 2020 em condições de sequeiro com 19 766,5 kg ha⁻¹, enquanto a menor foi registada em 2021 com a estratégia de rega total com 4 726,1 kg ha⁻¹. A rega deficitária (DI) pareceu mitigar as necessidades hídricas de cada ciclo cultural, mantendo rendimentos nunca inferiores aos outros tratamentos nos quatro anos, demonstrando uma melhoria estatisticamente significativa em 2022 ($p < 0,05$), em que a produtividade das videiras da estratégia DI superou o as da estratégia de sequeiro (R). Estes resultados reforçam a hipótese que dotações de rega mesmo que limitadas, quando oportunas podem gerar benefícios agronómicos de longo prazo (Oliver-Manera et al. 2024).

No que respeita à qualidade do mosto, os parâmetros avaliados foram o teor alcoólico provável, a acidez titulável e o pH. Estes não apresentaram muitas variações entre tratamentos no cv. Loureiro. O cv. Loureiro registou um máximo de teor de álcool provável de 11,3% na estratégia FI em 2021 e um mínimo de 10,18% também na mesma estratégia, mas em 2019, indicando diferenças entre os ciclos culturais. Quanto à acidez titulável, o cultivar Loureiro (capítulo 4.3) não apresentou variações significativas entre tratamentos e ciclos culturais (valores que oscilaram entre 7,64 a 8,31 g/L) com a DI a preservar geralmente uma acidez intermédia entre o sequeiro (R) e a rega total (FI) ao longo de todos os anos. Vários estudos demonstraram que o stress hídrico moderado durante a fase de maturação aumenta a acumulação de açúcar, a concentração de metabolitos secundários e precursores de aroma, contudo esta hipótese não ficou claramente vencedora neste estudo. (Acevedo-Opazo et al. 2010, Vilanova et al. 2019) .

A evolução temporal do desempenho da videira demonstra que a sua produtividade é altamente sensível às flutuações climáticas sazonais. No entanto, a longo prazo, a implementação de estratégias de rega deficitária revelou-se um meio eficaz para melhorar a produtividade sem comprometer as suas características enológicas. As conclusões destes estudos enfatizam a importância da aplicação da rega mesmo que deficitária (DI), de acordo com as necessidades de água da planta em cada momento do ciclo cultural, particularmente no contexto das alterações climáticas, que se prevê que aumentem a frequência de fenómenos climáticos extremos.

6 CONCLUSÕES

A principal conclusão retirada com esta tese é que, com base numa análise experimental plurianual, uma viticultura baseada exclusivamente em condições de sequeiro, que ainda está marcadamente presente na Região do Vinhos Verdes, é insuficiente para garantir a estabilidade produtiva e qualitativa dos cultivares *Vitis vinifera* L. cv. Loureiro e cv. Alvarinho. Num contexto de crescente variabilidade climática, será estritamente necessário regar os cultivares Loureiro e Alvarinho. Esta conclusão resulta de três estudos (capítulos 4.1, 4.2 e 4.3) que combinam indicadores fenológicos, produtivos, fisiológicos e hídricos. Verificou-se que a variabilidade climática entre os anos, comprometeu o rendimento dos cultivares em anos mais secos. Por exemplo, a produtividade do cultivar Loureiro em 2021 em condições de sequeiro foi de apenas 4,72 t ha⁻¹, em contraste com 22,89 t ha⁻¹ com a estratégia de rega total em 2020.

A implementação de estratégias de rega deficitária, adaptadas em função do solo, clima, características fenológicas e fisiológicas dos cultivares, representa a abordagem mais eficiente e sustentável para a adaptação da viticultura da Região dos Vinhos Verdes às alterações climáticas. Os tratamentos de rega deficitária obtiveram bons resultados de produtividade da água (WP) e da eficiência do uso da água (WUE), mantendo a qualidade das uvas. Neste tratamento com rega deficitária o cv. Alvarinho, atingiu produtividades da água, que variaram entre 2,46 kg m⁻³ em 2018 e 1,24 kg m⁻³ em 2019, enquanto para o cv. Loureiro, também em DI, obteve valores que oscilaram entre 1,07 kg m⁻³ (2021) e 4,73 kg m⁻³ (2020). Com estes resultados podemos concluir que existe uma grande variação neste indicador entre os ciclos culturais, fortemente influenciada pelo clima bem como pela oscilação produtiva entre anos, pois os anos com valores de produtividade elevados tendem a ser precedidos e seguidos de anos com valores mais baixos de produtividade.

A calibração e validação do modelo SIMDualKc facilitou a determinação precisa do coeficiente cultural basal (K_{cb}) por cultivar, fase fenológica e condições de cultura da videira, com presença de cobertura vegetal ativa. Para o cv. Loureiro, os coeficientes culturais basais calibrados foram determinados como $K_{cb\ ini}=0,33$, $K_{cb\ mid}=0,68$ e $K_{cb\ end}=0,54$. O cv. Alvarinho apresentou menos vigor e foi cultivado com uma densidade de plantação mais baixa, resultando na determinação dos seguintes valores: $K_{cb\ ini}=0,22$, $K_{cb\ mid}=0,53$ e $K_{cb\ end}=0,24$. Estas variações são indicativas das características únicas inerentes aos cultivares, sublinhando assim a necessidade de coeficientes culturais basais personalizadas de acordo com o cultivar. A incorporação da evaporação do solo (K_e), da transpiração (T) e do coeficiente de stress hídrico (K_s) no modelo permitiu a separação detalhada dos componentes do consumo de água e a quantificação precisa do consumo real de água pela cultura e pela cobertura vegetal ativa.

A monitorização fisiológica do stress hídrico, conforme indicado pelo potencial hídrico do ramo (SWP), apresentou uma forte correlação com os padrões de evapotranspiração e déficit de pressão de vapor (VPD). Verificou-se que os tratamentos de rega deficitária mantiveram as videiras em níveis de stress moderados durante a maior parte do ciclo de cultural. No cv. Loureiro, embora os valores de SWP tenham estado inferiores a -1,1 MPa em certas ocasiões, a recuperação fisiológica subsequente demonstrou a resiliência desta cultivar. A variabilidade entre ciclos culturais nos valores de $ET_{c\ act}$ (variando de 269 mm a 396 mm) e T (variando de 140 mm a 241 mm) também foi observada entre anos e tratamentos, refletindo a resposta da cultura às condições climáticas e ao teor de água do solo.

A análise dos parâmetros enológicos no mosto do cv. Loureiro revelou que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos em relação ao pH, acidez titulável e teor alcoólico provável, embora tenha sido observada uma tendência para maior massa de bagos e número de cachos em estratégias com rega. Nesse sentido a rega deficitária, combinada com a sua maior eficiência do uso da água, apoia a viabilidade desta estratégia como resposta à manutenção da produtividade sem comprometer a qualidade do mosto.

Em conclusão, uma visão holística onde se incluiu a monitorização fisiológica, a modelação dos coeficientes culturais basais para cada fase do ciclo cultural e da experimentação no terreno, permitiu a validação de um modelo operacional para a transição da viticultura de sequeiro para sistemas resilientes às alterações climáticas. A metodologia empregada e validada neste estudo é transferível para outros cultivares desta região, bem como para outras regiões vitícolas. Esta metodologia constitui um instrumento para a formulação de estratégias de adaptação à escassez de água, mitigação dos efeitos das alterações climáticas e modernização das práticas vitícolas, principalmente para preservar a identidade dos vinhos produzidos na Região dos Vinhos Verdes, mesmo num clima incerto e em mudança.

7 BIBLIOGRAFIA

- Abreu, F.S. 2020. Efeito do terroir no perfil do vinho da casta Alvarinho.
- Abreu, I., I. Costa, M. Oliveira, M. Cunha, and R. De Castro. 2006. Ultrastructure and germination of *Vitis vinifera* cv. Loureiro pollen. *Protoplasma* 228(1–3): 131–135. doi: 10.1007/s00709-006-0167-1.
- Acevedo-Opazo, C., S. Ortega-Farias, and S. Fuentes. 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agric. Water Manag.* 97(7): 956–964. doi: 10.1016/j.agwat.2010.01.025.
- Adão, F., J.C. Campos, J.A. Santos, A.C. Malheiro, and H. Fraga. 2023. Relocation of bioclimatic suitability of Portuguese grapevine varieties under climate change scenarios. *Front. Plant Sci.* 14(February): 1–14. doi: 10.3389/fpls.2023.974020.
- Allen, R.G. 1996. Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 122(2): 97–106. doi: 10.1061/(asce)0733-9437(1996)122:2(97).
- Allen, R.G., and L.S. Pereira. 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrig. Sci.* 28(1): 17–34. doi: 10.1007/s00271-009-0182-z.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, M. Smith, and D. Raes. 1998. Crop Evapotranspiration. Guide- lines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrig. Drain. Pap.* 56: 300.
- Aloui, S., A. Mazzoni, A. Elomri, J. Aouissi, A. Boufekane, et al. 2023. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *J. Environ. Manage.* 326(PB): 116799. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116799.
- Amorim, M. 2014. Efeito de estratégias de rega deficitária no desenvolvimento vegetativo e produção de Loureiro/ 1103-P na Região Demarcada dos Vinhos Verdes.
- An, N., M.T. Turp, B. Orgen, B. Bilgin, and M.L. Kurnaz. 2022. Analysis of the impact of climate change on grapevines in Turkey using heat unit accumulation-based indices. *Int. J. Biometeorol.* 66(11): 2325–2338. doi: 10.1007/s00484-022-02360-9.
- Baggiolini, M., H. Lorenz, H. Bleiholder, V.D.B. T, R. Stauss, et al. 1993. Stades

- phénologiques repères de la vigne. *Arboric. Hortic.* 44(12): 7–9.
- Baltazar, M., I. Castro, and B. Gonçalves. 2025. Adaptation to Climate Change in Viticulture: The Role of Varietal Selection—A Review. *Plants* 14(1): 1–36. doi: 10.3390/plants14010104.
- Bindi, M., L. Fibbi, B. Gozzini, S. Orlandini, and F. Miglietta. 1996. Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Clim. Res.* 7(3): 213–224. doi: 10.3354/cr007213.
- Böhm, J. 2010. *O Grande Livro das Castas* (C.F. Publicações, editor).
- Branas, J., G. Bernon, and L. Levadoux. 1946. *Eléments de viticulture générale* (École National d’Agriculture de Montpellier, editor).
- Cabral, I.L., A. Teixeira, M. Ferrier, A. Lanoue, J. Valente, et al. 2023. Canopy management through crop forcing impacts grapevine cv. ‘Touriga Nacional’ performance, ripening and berry metabolomics profile. *Oeno One* 57(1): 55–69. doi: 10.20870/oeno-one.2023.57.1.7122.
- Campos, A.C.P. 2012. O Alvarinho como produto impulsor do enoturismo em Monção.
- Cancela, J.J., M. Fandiño, B.J. Rey, and E.M. Martínez. 2015. Automatic irrigation system based on dual crop coefficient, soil and plant water status for *Vitis vinifera* (cv Godello and cv Mencía). *Agric. Water Manag.* 151: 52–63. doi: 10.1016/j.agwat.2014.10.020.
- Cancela, J.J., E. Trigo-Córdoba, E.M. Martínez, B.J. Rey, Y. Bouzas-Cid, et al. 2016. Effects of climate variability on irrigation scheduling in white varieties of *Vitis vinifera* (L .) of NW Spain. *Agric. Water Manag. J.* 170: 99–109. doi: 10.1016/j.agwat.2016.01.004.
- Cardoso, A.B. 2017. *VV.AA. Vinho Verde. História e Património-History and Heritage*. Porto: APHVIN/GEHVID—Associação Portuguesa de História da Vinha e do Vinho, 2015. *Rev. Iberoam. Vitic. Agroind. y Rural.* 4(11): 214–216. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=469550538013>.
- Di Carlo, P., E. Aruffo, W.H. Brune, P. Di, E. Aruffo, et al. 2019. Precipitation intensity under a warming climate is threatening some Italian premium wines. *Sci. Total Environ.* 685: 508–513. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.449.
- Chaves, M.M., O. Zarrouk, R. Francisco, J.M. Costa, T. Santos, et al. 2010. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Ann. Bot.* 105(5): 661–676. doi: 10.1093/aob/mcq030.
- CIPVV. 2018. *Resenha histórica dos Vinhos Verdes*. <https://www.cipvv.pt/pt/vinho->

verde/resenha-historica-dos-vinhos-verdes/.

- Cunha, M., and C. Richter. 2012. Measuring the impact of temperature changes on the wine production in the Douro Region using the short time fourier transform. *Int. J. Biometeorol.* 56(2): 357–370. doi: 10.1007/s00484-011-0439-0.
- CVRVV. 2024. Regulamento de Produção e Comércio da DO Vinho Verde. : 1–17.
- Daler, S. 2024. Improving grapevine (*Vitis vinifera* L., cv. Superior Seedless) drought tolerance with cerium oxide nanoparticles: Agronomic and molecular insights. *Sci. Hortic.* (Amsterdam). 338(September). doi: 10.1016/j.scienta.2024.113606.
- Dinu, D.G., V. Ricciardi, C. Demarco, G. Zingarofalo, G. De Lorenzis, et al. 2021. Climate change impacts on plant phenology: Grapevine (*vitis vinifera*) bud break in wintertime in southern italy. *Foods* 10(11). doi: 10.3390/foods10112769.
- Droulia, F., and I. Charalampopoulos. 2021. Future Climate Change Impacts on European Viticulture: A Review on Recent Scientific Advances. *Atmosphere* (Basel). 12(4). doi: 10.3390/atmos12040495.
- El-Nashar, W., and A. Elyamany. 2023. Adapting Irrigation Strategies to Mitigate Climate Change Impacts: A Value Engineering Approach. *Water Resour. Manag.* 37(6–7): 2369–2386. doi: 10.1007/s11269-022-03353-4.
- El-Sadek, A. 2014. Water use optimisation based on the concept of Partial Rootzone Drying. *Ain Shams Eng. J.* 5(1): 55–62. doi: 10.1016/j.asej.2013.09.004.
- Er-Raki, S., E. Bouras, J.C. Rodriguez, C.J. Watts, C. Lizarraga-Celaya, et al. 2021. Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. *Agric. Water Manag.* 245(May 2020): 106585. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106585.
- European Commission. 2019. Pacto Ecológico Europeu. : 1–27. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- European Commission. 2022. Extract from the register of protected designation of origin and protected geographical indications established by article 104 of regulation (EU) no 1308/2013. *Eur. Comm. Dir. Agric. Rural Dev.*
- Fandiño, M. 2021. Necesidades de Agua e influencia de los sistemas de riego en *vitis vinifera* var. Albariño.
- Fandiño, M., J.J. Cancela, B.J. Rey, E.M. Martínez, R.G. Rosa, et al. 2012. Using the dual-K c approach to model evapotranspiration of Albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv.

- Albariño) with consideration of active ground cover. *Agric. Water Manag.* 112: 75–87. doi: 10.1016/j.agwat.2012.06.008.
- Fandiño, M., J.L. Olmedo, E.M. Martínez, J. Valladares, P. Paredes, et al. 2015. Assessing and modelling water use and the partition of evapotranspiration of irrigated hop (*Humulus Lupulus*), and relations of transpiration with hops yield and alpha-acids. *Ind. Crops Prod.* 77: 204–217. doi: 10.1016/j.indcrop.2015.08.042.
- FAO. 2012. *AquaCrop: Reference Manual*. Ref. Man. AQUACROP (June): 125.
- FAO & WWC. 2015. *Towards a Water and Food Secure Future*. White Pap.: 61. <http://www.fao.org/3/i4560e/i4560e.pdf>.
- Faticchi, S., A. Paschalis, S. Bonetti, G. Manoli, and C. Pappas. 2023. Water use efficiency: A review of spatial and temporal variability. In: Goss, M.J. and Oliver, M.B.T.-E. of S. in the E. (Second E., editors. Academic Press, Oxford. p. 527–542
- Fernández, E. 2023. Editorial note on terms for crop evapotranspiration, water use efficiency and water productivity. *Agric. Water Manag.* 289(October): 2021–2023. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108548.
- Fischer, G., F.N. Tubiello, H. van Velthuizen, and D.A. Wiberg. 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. *Technol. Forecast. Soc. Change* 74(7): 1083–1107. doi: 10.1016/j.techfore.2006.05.021.
- Fonseca, A., H. Fraga, and J.A. Santos. 2023. Exposure of Portuguese viticulture to weather extremes under climate change. *Clim. Serv.* 30(February). doi: 10.1016/j.cliser.2023.100357.
- Fraga, H., I. García, D.C. Atauri, and A.C. Malheiro. 2017. Viticulture in Portugal: A review of recent trends and climate change projections Volume. 51(2): 61–69. doi: 10.20870/oenone.2016.0.0.1621.
- Fraga, H., A.C. Malheiro, J. Moutinho-Pereira, and J.A. Santos. 2013. Future scenarios for viticultural zoning in Europe: Ensemble projections and uncertainties. *Int. J. Biometeorol.* 57(6): 909–925. doi: 10.1007/s00484-012-0617-8.
- Fraga, H., A.C. Malheiro, J. Moutinho-Pereira, and J.A. Santos. 2014. Climate factors driving wine production in the Portuguese Minho region. *Agric. For. Meteorol.* 185: 26–36. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.11.003.
- Fraga, H., and J.A. Santos. 2021. Assessment of Climate Change Impacts on Chilling and Forcing for the Main Fresh Fruit Regions in Portugal. *Front. Plant Sci.* 12(June): 1–13.

doi: 10.3389/fpls.2021.689121.


- Fraga, H., J.A. Santos, J. Moutinho-Pereira, C. Carlos, J. Silvestre, et al. 2016. Statistical modelling of grapevine phenology in Portuguese wine regions: Observed trends and climate change projections. *J. Agric. Sci.* 154(5): 795–811. doi: 10.1017/S0021859615000933.
- Gaitan, E., and M.R. Pino-Otin. 2023. Using bioclimatic indicators to assess climate change impacts on the Spanish wine sector. *Atmos. Res.* 286. doi: 10.1016/j.atmosres.2023.106660.
- Garcia, L., F. Celette, C. Gary, A. Ripoché, H. Valdés-Gómez, et al. 2018. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 251(September 2017): 158–170. doi: 10.1016/j.agee.2017.09.030.
- Girona, J., J. Marsal, M. Mata, J. Del Campo, and B. Basile. 2009. Phenological sensitivity of berry growth and composition of tempranillo grapevines (*Vitis Vinifera* L.) to water stress. *Aust. J. Grape Wine Res.* 15(3): 268–277. doi: 10.1111/j.1755-0238.2009.00059.x.
- González Perea, R., A. Daccache, J.A. Rodríguez Díaz, E. Camacho Poyato, and J.W. Knox. 2018. Modelling impacts of precision irrigation on crop yield and in-field water management. *Precis. Agric.* 19(3): 497–512. doi: 10.1007/s11119-017-9535-4.
- Guedes, J.P., T.V. Cardoso, T. Fernandes, F. Mendes, M.M. Baleiras-Couto, et al. 2024. Exploring wine yeast natural biodiversity to select strains with enological traits adapted to climate change. *Heliyon* 10(18). doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36975.
- Hedley, C.B., and I.J. Yule. 2009. A method for spatial prediction of daily soil water status for precise irrigation scheduling. *Agric. Water Manag.* 96(12): 1737–1745. doi: 10.1016/j.agwat.2009.07.009.
- Heleno, S.A., and I.C.F.R. Ferreira. 2024. The Influence of Climate Change on Portuguese Wines. <https://www.ciencia-e-vinho.com/2024/10/06/the-influence-of-climate-change-on-portuguese-wines/>.
- Herrera, J.C., B. Bucchetti, P. Sabbatini, P. Comuzzo, L. Zulini, et al. 2015. Effect of water deficit and severe shoot trimming on the composition of *Vitis vinifera* L. Merlot grapes and wines. *Aust. J. Grape Wine Res.* 21(2): 254–265. doi: 10.1111/ajgw.12143.
- Huglin, P. 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus l'Académie d'Agriculture Fr.* 64: 1117–1126.
- IGEF. 1986. Catálogo das castas da Região dos Vinhos Verdes. Instituto. Tipografia Guerra,

Viseu.

- Iglesias, A., and L. Garrote. 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agric. Water Manag.* 155: 113–124. doi: 10.1016/j.agwat.2015.03.014.
- IVV. 2011. Regiões vitivinícolas de Portugal. Inst. da Vinha e do Vinho.
- IVV. 2021. Caderno de Especificações do Vinho Verde. : 1–20.
- IVV. 2022. Dados estatísticos do sector vitivinícola. <https://www.ivv.gov.pt/np4/estatistica/>.
- IVV. 2023. Mapa das Regiões. <https://www.ivv.gov.pt/np4/785/> (accessed 3 October 2025).
- IVV. 2025. Exportações de Vinho Verde com subida recorde. <https://www.ivv.gov.pt/np4/2790.html>.
- Jones, G. V, and F. Alves. 2012. Spatial Analysis of Climate in Winegrape Growing Regions in Portugal. *IXe Congrès Int. des Terroirs Vitivinic.* 1: 3–4.
- Jones, G. V., M.A. White, O.R. Cooper, and K. Storchmann. 2005. Climate change and global wine quality. *Clim. Change* 73(3): 319–343. doi: 10.1007/s10584-005-4704-2.
- Jorge, E. 2016. Da casta ao Terroir: Posicionamento estratégico do vinho Alvarinho produzido na Sub-região de Monção e Melgaço para o mercado dos grandes vinhos brancos mundiais Eloi.
- Jorquera-Fontena, E., and R. Orrego-Verdugo. 2010. Impact of global warming on the phenology of a variety of grapevine grown in southern Chile. *Agrociencia* 44(4): 427–435. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77956431876&partnerID=40&md5=cbfd39ad6a822394f543df4f3e4be196>.
- Junquera, P., J.R. Lissarrague, L. Jiménez, R. Linares, and P. Baeza. 2012. Long-term effects of different irrigation strategies on yield components, vine vigour, and grape composition in cv. Cabernet-Sauvignon (*Vitis vinifera* L.). *Irrig. Sci.* 30(5): 351–361. doi: 10.1007/s00271-012-0348-y.
- Kamila, S., W.D. Widodo, E. Santosa, and M.R. Suhartanto. 2024. Flowering and fruiting phenology in two varieties of grapes (*Vitis vinifera*) in tropical regions, Indonesia. *Biodiversitas* 25(11): 4593–4602. doi: 10.13057/biodiv/d251158.
- Khadatkar, A., C.P. Sawant, D. Thorat, A. Gupta, S. Jadhav, et al. 2025. A comprehensive review on grapes (*Vitis* spp.) cultivation and its crop management. *Discov. Agric.* 3(1): 9. doi: 10.1007/s44279-025-00162-2.

Kostiakov, A.. 1932. The Dynamics of the Coefficient of Water Percolation in Soils and the

- Necessity for Studying It from a Dynamic Point of View for Purpose of Amelioration. *Soc. Soil Sci.* 14: 17–21.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Zeitschrift* 15(3): 259–263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Koufos, G.C., T. Mavromatis, S. Koundouras, N.M. Fyllas, S. Theocharis, et al. 2022. Greek Wine Quality Assessment and Relationships with Climate: Trends, Future Projections and Uncertainties. *WATER* 14(4). doi: 10.3390/w14040573.
- Labbé, T., C. Pfister, S. Brönnimann, D. Rousseau, J. Franke, et al. 2019. The longest homogeneous series of grape harvest dates , Beaune 1354 – 2018 , and its significance for the understanding of past and present climate. : 1485–1501.
- Leeuwen, C. Van, O. Tregoat, X. Choné, B. Bois, D. Pernet, et al. 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin* 43(3): 121–134. doi: 10.20870/oeno-one.2009.43.3.798.
- Lima, D.C.A., G. Lemos, V.A. Bento, M. Nogueira, and P.M.M. Soares. 2023. A multi-variable constrained ensemble of regional climate projections under multi-scenarios for Portugal – Part I: An overview of impacts on means and extremes. *Clim. Serv.* 30(May 2022): 100351. doi: 10.1016/j.cliser.2023.100351.
- Liu, Y., L.S. Pereira, and R.M. Fernando. 2006. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agric. Water Manag.* 84(1–2): 27–40. doi: 10.1016/j.agwat.2006.01.018.
- Ma, X., F. Han, J. Wu, Y. Ma, and P.W. Jacoby. 2023. Optimizing crop water productivity and altering root distribution of Chardonnay grapevine (*Vitis vinifera* L.) in a silt loam soil through direct root-zone deficit irrigation. *Agric. Water Manag.* 277(November 2022): 108072. doi: 10.1016/j.agwat.2022.108072.
- Magalhães, N. 2015. *Tratado de Viticultura*. Agrobook. Agrobook.
- Malheiro, A.C., J.A. Santos, H. Fraga, and J.G. Pinto. 2010. Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Clim. Res.* 43(3): 163–177. doi: 10.3354/cr00918.
- Marasà, G., J. Ferreira, M. Mota, and M. Malfeito-Ferreira. 2024. Understanding the Mellowing Effect of Bottle Aging on the Sensory Perceptions of Varietal Dry White Wines. *Beverages* 10(3): 78. doi: 10.3390/beverages10030078.

- Marques, H. 1987. Região demarcada dos vinhos verdes. *Rev. da Fac. Let. Geogr.* III: pp 135. <http://hdl.handle.net/10216/9075>.
- Martínez-Moreno, A., E.P. Pérez-Álvarez, D.S. Intrigliolo, J.M. Mirás-Avalos, R. López-Urrea, et al. 2023. Effects of deficit irrigation with saline water on yield and grape composition of *Vitis vinifera* L. cv. Monastrell. *Irrig. Sci.* 41(4): 469–485. doi: 10.1007/s00271-022-00795-x.
- Martínez, E.M., B.J. Rey, M. Fandiño, and J.J. Cancela. 2013. Comparison of two techniques for measuring leaf water potential in *vitis vinifera* var. Albariño. *Cienc. e Tec. Vitivinic.* 28(1): 29–41.
- Massano, L., G. Fossier, M. Gaetani, and B. Bois. 2023. Assessment of climate impact on grape productivity: A new application for bioclimatic indices in Italy. *Sci. Total Environ.* 905(May): 167134. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167134.
- Millan, M., R. Albasha, S. Delivorias, R. Boulord, and T. Simonneau. 2025. Using functional – structural models to design architectural ideotypes of grapevine to cope with extreme heat and water stresses : a multi-criteria analysis. (April).
- Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas. 1999. Decreto-Lei n.º 263/99 de 14 de Julho. *Diário da República* n.º 162 — 14-7-1999.
- Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas. 2010. Portaria n.º 668/2010, de 11 de agosto. *Diário da República* n.º 155/2010: 3341–3349.
- Miras-Avalos, J.M., and E.S. Araujo. 2021. Optimization of vineyard water management: Challenges, strategies, and perspectives. *Water (Switzerland)* 13(6): 1–32. doi: 10.3390/w13060746.
- Mirás-Avalos, J.M., J.J. Cancela, M. Fandiño, B.J. Rey, and J. Dafonte. 2020. Zoning of a newly-planted vineyard: Spatial variability of physico-chemical soil properties. *Soil Syst.* 4(4): 1–17. doi: 10.3390/soilsystems4040062.
- Molitor, D., J. Junk, D. Evers, L. Hoffmann, and M. Beyer. 2013. A High-Resolution Cumulative Degree Day-Based Model to Simulate Phenological Development of Grapevine. (January 2016). doi: 10.5344/ajev.2013.13066.
- Munitz, S., Y. Netzer, I. Shtein, and A. Schwartz. 2018. Water availability dynamics have long-term effects on mature stem structure in *Vitis vinifera*. *Am. J. Bot.* 105(9): 1443–1452. doi: 10.1002/ajb2.1148.
-  Núñez, A., and M. Schipanski. 2023. Changes in soil organic matter after conversion from

- irrigated to dryland cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 347(January). doi: 10.1016/j.agee.2023.108392.
- Official Journal of the European Union. 2024. Publication of an application for the approval of a non minor amendment to a product specification for a protected designation of origin in the wine sector pursuant to Article 97(3) in conjunction with Article 105 of Regulation (EU) No 1308/2013 of the Eu. 3412.
- Ohana-Levi, N., I. Zachs, N. Hagag, L. Shemesh, and Y. Netzer. 2022. Grapevine stem water potential estimation based on sensor fusion. *Comput. Electron. Agric.* 198(April): 107016. doi: 10.1016/j.compag.2022.107016.
- Oliveira, M.J.R.A., S. Castro, S. Paltrinieri, A. Bertaccini, M. Sottomayor, et al. 2020. “Flavescence dorée” impacts growth, productivity and ultrastructure of *Vitis vinifera* plants in Portuguese “Vinhos Verdes” region. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 261(November 2019): 108742. doi: 10.1016/j.scienta.2019.108742.
- Oliveira, M., and M. Cunha. 2015. Study of the Portuguese populations of powdery mildew fungus from diverse grapevine cultivars (*vitis vinifera*). *J. Int. des Sci. la Vigne du Vin* 49(3): 173–182. doi: 10.20870/oeno-one.2015.49.3.83.
- Oliveira, J.M., P. Oliveira, R.L. Baumes, and M.O. Maia. 2008. Volatile and glycosidically bound composition of loureiro and alvarinho wines. *Food Sci. Technol. Int.* 14(4): 341–353. doi: 10.1177/1082013208097442.
- Oliver-Manera, J., O. García-Tejera, M. Mata, and J. Girona. 2024. Long-Term Study of the Crop Forcing Technique on cv. Tempranillo (*Vitis vinifera* L.) Vines and Suggested Irrigation Strategies to Improve Water Use Efficiency of Forced Vines. *Agronomy* 14(1). doi: 10.3390/agronomy14010130.
- Paço, T.A., P. Paredes, L.S. Pereira, J. Silvestre, and F.L. Santos. 2019. Crop coefficients and transpiration of a super intensive Arbequina olive orchard using the dual Kc approach and the Kcb computation with the fraction of ground cover and height. *Water (Switzerland)* 11(2). doi: 10.3390/w11020383.
- Padgett-Johnson, M., L.E. Williams, and M.A. Walker. 2003. Vine water relations, gas exchange, and vegetative growth of seventeen *Vitis* species grown under irrigated and nonirrigated conditions in California. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128(2): 269–276. doi: 10.21273/jashs.128.2.0269.
- Pagay, V., and C. Collins. 2017. Effects of timing and intensity of elevated temperatures on

- reproductive development of field-grown Shiraz grapevines. *Oeno One* 51(4): 409–421. doi: 10.20870/oeno-one.2017.51.4.1066.
- Paredes, P., G.C. Rodrigues, M. do R. Cameira, M.O. Torres, and L.S. Pereira. 2017. Assessing yield, water productivity and farm economic returns of malt barley as influenced by the sowing dates and supplemental irrigation. *Agric. Water Manag.* 179: 132–143. doi: 10.1016/j.agwat.2016.05.033.
- Paredes, P., G.J. Rodrigues, M.T. Petry, P.O. Severo, R. Carlesso, et al. 2018. Evapotranspiration partition and crop coefficients of Tifton 85 bermudagrass as affected by the frequency of cuttings. Application of the FAO56 dual Kc model. *Water (Switzerland)* 10(5). doi: 10.3390/w10050558.
- Pellegrino, A., E. Lebon, M. Voltz, and J. Wery. 2005. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant Soil* 266(1–2): 129–142. doi: 10.1007/s11104-005-0874-y.
- Pellin, V., I.J. Grimm, C.A.C. Sampaio, and O.M. Júnior. 2020. Enoturismo e Desenvolvimento: Um Olhar na Rota dos Vinhos Verdes em Portugal. *Rev. Turydes Tur. y Desarro.* 29: 139–160. <https://www.eumed.net/es/revistas/turydes/vol-13-no-29-diciembre-dezembro-2020/enoturismo->.
- Pereira, L.S., R.G. Allen, M. Smith, and D. Raes. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agric. Water Manag.* 147: 4–20. doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.031.
- Pereira, L.S., P. Paredes, and N. Jovanovic. 2020a. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agric. Water Manag.* 241(July): 106357. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106357.
- Pereira, L.S., P. Paredes, F. Melton, L. Johnson, T. Wang, et al. 2020b. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. *Agric. Water Manag.* 241(March): 106197. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106197.
- Petry, M.T., T.F. Magalhães, P. Paredes, J.D. Martins, C.M. Ferrazza, et al. 2023. Water use and crop coefficients of soybean cultivars of diverse maturity groups and assessment of related water management strategies. *Irrig. Sci.* 42(6): 1295–1310. doi: 10.1007/s00271-023-00871-w.

- Phogat, V., M.A. Skewes, M.G. McCarthy, J.W. Cox, J. Šimůnek, et al. 2017. Evaluation of crop coefficients, water productivity, and water balance components for wine grapes irrigated at different deficit levels by a sub-surface drip. *Agric. Water Manag.* 180: 22–34. doi: 10.1016/j.agwat.2016.10.016.
- Pieri, P., E. Lebon, and N. Brisson. 2012. Climate Change Impact on French Vineyards as Predicted by Models (B. Bravdo and H. Medrano, editors). XXVIII Int. Hortic. Congr. Sci. Hortic. PEOPLE Int. Symp. Eff. Clim. Chang. Prod. Qual. GRAPEVINES THEIR Prod. 931(28th Int Horticultural Congr on Sci and Horticulture for People/Int Symp on the Effect of Climate Change on Production and Quality of Grapevines and their Products): 29–37.
- Puig-Sirera, À., G. Rallo, P. Paredes, T.A. Paço, M. Minacapilli, et al. 2021. Transpiration and water use of an irrigated traditional olive grove with sap-flow observations and the fao56 dual crop coefficient approach. *Water (Switzerland)* 13(18). doi: 10.3390/w13182466.
- Ragab, R. 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: The SALTMED model. *Environ. Model. Softw.* 17(4): 345–361. doi: 10.1016/S1364-8152(01)00079-2.
- Rahman, M.A., S. Arndt, F. Bravo, P.K. Cheung, N. van Doorn, et al. 2024. More than a canopy cover metric: Influence of canopy quality, water-use strategies and site climate on urban forest cooling potential. *Landsc. Urban Plan.* 248(December 2023). doi: 10.1016/j.landurbplan.2024.105089.
- Rallo, G., T.A. Paço, P. Paredes, Puig-Sirera, R. Massai, et al. 2021. Updated single and dual crop coefficients for tree and vine fruit crops. *Agric. Water Manag.* 250(February): 106645. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106645.
- Ramos, M.C. 2025. The Influence of Weather Conditions and Available Soil Water on *Vitis vinifera* L. Albillo Mayor in Ribera del Duero DO (Spain) and Potential Changes Under Climate Change: A Preliminary Analysis. *Agric.* 15(11): 1–15. doi: 10.3390/agriculture15111229.
- Ramos, M.C., and F.M. de Toda. 2022. Influence of weather conditions and projected climate change scenarios on the suitability of *Vitis vinifera* cv. Carignan in Rioja DOCa, Spain. *Int. J. Biometeorol.* 66(6): 1067–1078. doi: 10.1007/s00484-022-02258-6.
- Reis, S., H. Fraga, C. Carlos, J. Silvestre, J. Eiras-Dias, et al. 2020. Grapevine phenology in four portuguese wine regions: Modeling and predictions. *Appl. Sci.* 10(11). doi: 10.3390/app10113708.

- Res, C., M.C. Ramos, G. V Jones, and J.A. Martínez-Casasnovas. 2008. Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in northeast Spain. *Clim. Res.* 38(1): 1–15. doi: 10.3354/cr00759.
- Ribeiro, J.D., and E. Figueiredo. 2018. Between Localness and Deterritorialization in Nemea and Basto Wine Regions * Entre localidad y desterritorialización en las regiones vitivinícolas de Nemea y Basto. *RIVAR (Revista Iberoam. Vitic. Agroind. y Rural.* 5(May).
- Roca, M., V. Silva, and S. Caldinhas. 2001. Demographic Sustainability and Regional Development: The Cases of Alto Minho and Alto Alentejo. *ERSA(European Reg. Sci. Assoc. 41st Congr. Zagreb.*
- Romero, P., P. Botía, E. Morote, and J.M. Navarro. 2024. Optimizing deficit irrigation in Monastrell vines grafted on rootstocks of different vigour under semi-arid conditions. *Agric. Water Manag.* 292(October 2023): 108669. doi: 10.1016/j.agwat.2024.108669.
- Rosa, R.D., P. Paredes, G.C. Rodrigues, I. Alves, R.M. Fernando, et al. 2012a. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agric. Water Manag.* 103: 8–24. doi: 10.1016/j.agwat.2011.10.013.
- Rosa, R.D., P. Paredes, G.C. Rodrigues, R.M. Fernando, I. Alves, et al. 2012b. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. *Agric. Water Manag.* 103: 62–77. doi: 10.1016/j.agwat.2011.10.018.
- Ruano-Rosa, D., E. Sánchez-Hernández, R. Baquero-Foz, P. Martín-Ramos, J. Martín-Gil, et al. 2022. Chitosan-Based Bioactive Formulations for the Control of Powdery Mildew in Viticulture. *Agronomy* 12(2): 1–13. doi: 10.3390/agronomy12020495.
- Santesteban, L.G., C. Miranda, D. Marín, B. Sesma, D.S. Intrigliolo, et al. 2019. Discrimination ability of leaf and stem water potential at different times of the day through a meta-analysis in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.* 221(April): 202–210. doi: 10.1016/j.agwat.2019.04.020.
- Santos, J.A., H. Fraga, A.C. Malheiro, J. Moutinho-Pereira, L.T. Dinis, et al. 2020. A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture. *Appl. Sci.* 10(9): 1–28. doi: 10.3390/app10093092.
- Schultze, S.R., and P. Sabbatini. 2022. Impact of Early Season Temperatures in a Climate-Changed Atmosphere for Michigan: A Cool-Climate Viticultural Region. *Atmosphere*

- (Basel). 13(2). doi: 10.3390/atmos13020251.
- Seljaninovic, G.T. 1966. *Agroclimatic Map of the World*. Hydrometeoizdat Publishing House, Leningrad.
- Sgubin, G., D. Swingedouw, G. Dayon, I.G. De Cortázar-atauri, N. Ollat, et al. 2018. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agric. For. Meteorol.* 250(September 2017): 226–242. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.12.253.
- Shellie, K.C. 2014. Water productivity, yield, and berry composition in sustained versus regulated deficit irrigation of merlot grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* 65(2): 197–205. doi: 10.5344/ajev.2014.13112.
- Silvia, R., M. Cátia, F.S. Natacha, S. C., and G. António. 2022. 'Vinho Verde' wines production from differential fermentation: the role of musts sulphitation as a preservation strategy to keep the musts character. *VES Conference Series, IVAS 2022*.
- Smith, D.M., A.A. Scaife, R. Eade, P. Athanasiadis, A. Bellucci, et al. 2020. North Atlantic climate far more predictable than models imply. *Nature* 583(7818): 796–800. doi: 10.1038/s41586-020-2525-0.
- Soares, P.M., D. Lima, R. Cardoso, M. Nogueira, G. Lemos, et al. 2022. WP2 CLIMATE PROJECTIONS, EXTREMES, AND INDICES: Mainland Portugal. *Natl. Roadmap Adapt.* 2100. doi: 10.5281/zenodo.13915540.
- Solman, S., M.F. Cabre, M.H. Gonzalez, M.N. Nunez, C. Res, et al. 2018. Bioclimatic zoning of Argentinian Malbec grape productivity regions by means of a unique combined index. *Clim. Res.* 74(3): 185–199. doi: 10.3354/cr01498.
- Stevens, R.M., and G. Harvey. 1996. Soil water depletion rates under large grapevines. *Aust. J. Grape Wine Res.* 2(3): 155–162. doi: 10.1111/j.1755-0238.1996.tb00103.x.
- Strandsbjerg Tristan Pedersen, J., F. Duarte Santos, D. van Vuuren, J. Gupta, R. Encarnação Coelho, et al. 2021. An assessment of the performance of scenarios against historical global emissions for IPCC reports. *Glob. Environ. Chang.* 66(February 2020). doi: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102199.
- Teixeira, R.J.S., S. Gomes, V. Malheiro, L. Pereira, J.R. Fernandes, et al. 2021. A multidisciplinary fingerprinting approach for authenticity and geographical traceability of Portuguese wines. *Foods* 10(5): 1–16. doi: 10.3390/foods10051044.
- Tonietto, J. 1999. Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France: méthodologie de

carácterisation.

- Valín, M.I., C. Araújo-Paredes, A.S. Rodrigues, and S. Mendes. 2021. Gestão da água na vinha - novas tecnologias. 10 anos de encontros vînicos do vinho verde
- Veihmeyer, F.J., and A.H. Hendrickson. 1949. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil Sci.* 68(1). https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/1949/07000/methods_of_measuring_field_capacity_and_permanent.7.aspx.
- Vercesi, A., M. Gatti, A. Garavani, F. Pelusi, and S. Poni. 2024. Autochthonous Red Varieties in the Oltrepò Pavese Wine District: An Effective Tool for Adaptation to Climate Change. *Horticulturae* 10(6). doi: 10.3390/horticulturae10060658.
- Vilanova, M., J.M. Rodríguez-Nogales, J. Vila-Crespo, and J. Yuste. 2019. Influence of water regime on yield components, must composition and wine volatile compounds of *Vitis vinifera* cv. Verdejo. *Aust. J. Grape Wine Res.* 25(1): 83–91. doi: 10.1111/ajgw.12370.
- Vine to Wine Circle. 2012. Região vitivinícola: Vinho Verde (MINHO). <https://www.vinetowinecircle.com/regioes/minho/>.
- Wei, Z., P. Paredes, Y. Liu, W.W. Chi, and L.S. Pereira. 2015. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. *Agric. Water Manag.* 147: 43–53. doi: 10.1016/j.agwat.2014.05.004.
- Winkler, A.J., J.A. Cook, W.M. Kliewer, and L.A. Lider. 1974. *General Viticulture*. 4th ed.
- Wohlfahrt, Y., J.P. Smith, S. Tittmann, B. Honermeier, and M. Stoll. 2018. Primary productivity and physiological responses of *Vitis vinifera* L. cvs. under Free Air Carbon dioxide Enrichment (FACE). *Eur. J. Agron.* 101(February): 149–162. doi: 10.1016/j.eja.2018.09.005.
- Wolfe, D.W., L. Ziska, C. Petzoldt, A. Seaman, L. Chase, et al. 2008. Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: Implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 13(5–6): 555–575. doi: 10.1007/s11027-007-9125-2.
- WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 106.
- Wunderlich, R.F., Y.P. Lin, and A. Ansari. 2023. Regional Climate Change Effects on the Viticulture in Portugal. *Environments* 10(1). doi: 10.3390/environments10010005.
- Yzarra, W., and J. Sanabria. 2015. IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON SOME GRAPEVINE VARIETIES. (June 2014): 103–112.

- Zarrouk, O., C. Brunetti, R. Egipto, C. Pinheiro, T. Genebra, et al. 2016. Grape ripening is regulated by deficit irrigation/elevated temperatures according to cluster position in the canopy. *Front. Plant Sci.* 7(NOVEMBER2016). doi: 10.3389/fpls.2016.01640.
- Zarrouk, O., C. Pinto, M.V. Alarcón, A. Flores-Roco, L. Santos, et al. 2024. Canopy Architecture and Sun Exposure Influence Berry Cluster–Water Relations in the Grapevine Variety Muscat of Alexandria. *Plants* 13(11). doi: 10.3390/plants13111500.



As alterações climáticas ameaçam a viticultura atlântica, sobretudo pela limitação de água para rega, tornando indispensável o uso eficiente deste recurso. Avaliaram-se os cv. Loureiro e Alvarinho sob três estratégias de rega (sequeiro, rega deficitária e rega total) em vinhas comerciais. A monitorização incluiu sondas capacitivas, câmaras de pressão e estações meteorológicas, complementada por simulações com o SIMDualKc. Os resultados evidenciaram variabilidade entre ciclos culturais. O sequeiro levou a stress hídrico e reduções significativas na produção, enquanto a rega deficitária aumentou o rendimento mantendo a qualidade do mosto. A rega deficitária destacou-se como a estratégia mais sustentável para a viticultura atlântica, conciliando produtividade e qualidade do mosto com uma utilização racional da água.