



TESIS DOCTORAL

**INTEGRACIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN Y SENSORES COMO HERRAMIENTA
DE EVALUACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS AGRONÓMICAS EN RIEGO
INTELIGENTE DE VIÑEDO**

GONZALO ESTEBAN SÁNCHEZ

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS SISTEMAS
AGROFORESTALES**

Conformidad del director y codirectores:

Francisco Jesús Moral García, Carlos Campillo Torres, Pablo Vidal López

Esta tesis cuenta con la autorización del director y codirectores de la misma y de la Comisión Académica del programa. Dichas autorizaciones constan en el Servicio de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Extremadura.

2024

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que me han ayudado y han formado parte de este camino.

En primer lugar, a mi director de tesis, Dr. Carlos Campillo. Por adentrarme en el mundo de la investigación enseñándome mucho sobre su metodología de trabajo, entusiasmo y ganas. Por estar siempre cuando lo he necesitado, guiándome y orientándome. Por aceptar ser mi director, transmitiéndome sus grandes conocimientos y pasión por el trabajo. Pero sobre todo por demostrar ser, además de buen profesional, buena persona.

A mis dos directores, Dr. Pablo Vidal y Dr. Francisco Jesús del Moral, por estar siempre a disposición para lo que he necesitado, realizando una labor de acompañamiento y escuchándome para todo aquello que necesitaba. Por estar de principio a fin en este camino de elaboración de esta tesis doctoral.

Al personal de CICYTEX, a todas aquellas personas que hacen que se lleven a cabo investigaciones que son beneficiosas para el sector, trabajando día a día. Concretamente al Dr. David Uriarte, por estar presente y dispuesto para cualquier consulta con una buena predisposición, por acompañarme en la elaboración de los artículos científicos. También a la Dra. María Henar Prieto, por acompañarme en el inicio junto a Carlos Campillo, abriéndome las puertas de su grupo de investigación y asesorándome en el trabajo realizado en el centro de investigación. A todas aquellas personas de este centro, que apoyaron de cualquier manera a la elaboración de esta tesis doctoral.

A todas las personas de la Universidad de Extremadura que me han asesorado y ayudado en este camino. A la Escuela de Ingenierías Agrarias, por ser mi segunda casa y por hacer una importante labor docente e investigadora para el sector. A los compañeros, trabajadores y estudiantes, que permiten que aprendamos juntos cada día.

Para finalizar, agradecer y hacer una mención especial a mi familia y pareja. Los momentos difíciles enseñan la suerte que tenemos de vivir en esta vida. Gracias por enseñarme a disfrutar del camino y de todos los momentos maravillosos que tiene. Gracias por estar, indiscutiblemente, día a día. Gracias por enseñarme a ser una persona humilde y trabajadora. Gracias por darme unos valores, que me acompañan todos los días. Sobre todo, gracias por enseñarme a ser buena persona, con el ejemplo.

***“Gestionar el tiempo,
es gestionar la vida.”***

Robin Sharma.

Financiación

Tesis doctoral financiada por:

-Proyecto PID2019-105039RR-C41/MCIN/AEI/10.13039/501100011033
subvencionado por Ministerio de Ciencia e Innovación de España y cofinanciado por
FEDER.

-Proyecto AGROS2022 subvencionado por la Junta de Extremadura y cofinanciado
por FEDER.

-Ministerio de Universidades de España. Formación de Profesorado Universitario
(FPU20/07314).

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. IMPORTANCIA DEL AGUA EN LA AGRICULTURA Y EN EL VIÑEDO.....	1
1.2. EL SUELO COMO UN DEPÓSITO DE AGUA.....	6
1.3. EFECTO DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE RIEGO EN EL CULTIVO DEL VIÑEDO.....	10
1.4. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA DE RIEGO A LA EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA.....	15
1.5. FRACCIÓN DE LA SUPERFICIE DEL SUELO HUMEDECIDA POR CADA RIEGO.....	17
1.6. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA HÍDRICA EN VIÑEDO.....	23
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS.....	30
CAPÍTULO 3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	31
3.1. LOCALIZACIÓN Y ENSAYO EXPERIMENTAL.....	31
3.2. MEDIDAS CON SENSOR TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR) DE FRACCIÓN HUMEDECIDA DE SUELO.....	35
3.3. MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC.....	38
3.3.1. <i>Datos de suelo</i>	39
3.3.2. <i>Datos climáticos</i>	41
3.3.3. <i>Cultivo</i>	43
3.3.4. <i>Riego</i>	46
3.3.5. <i>Combinación de datos</i>	50
3.4. MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO.....	51
3.5. MEDIDAS DE CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA.....	52
3.6. MEDIDAS DE PRODUCCIÓN.....	53
3.7. MEDIDAS DE TEMPERATURA EN UAV.....	53

CAPÍTULO 4. ARTÍCULO CIENTÍFICO: ASSESSING EFFECT OF IRRIGATION FREQUENCY ON EVAPORATION AND TRANSPIRATION IN VINEYARDS USING SIMDUALKC SIMULATION MODEL WITH MEASURED WET FRACTION	56
4.2. REFERENCIA COMPLETA, FACTOR DE IMPACTO Y CATEGORIZACIÓN DE LA PUBLICACIÓN.	56
<i>Referencia completa</i>	56
<i>Factor de impacto y categorización de la publicación</i>	56
4.2. RESUMEN Y PUBLICACIÓN COMPLETA.	57
<i>Resumen</i>	57
<i>Abstract</i>	58
<i>Publicación completa</i>	58
CAPÍTULO 5. ARTÍCULO CIENTÍFICO. TECHNICAL FEASIBILITY ANALYSIS OF ADVANCED MONITORING WITH A THERMAL CAMERA ON AN UNMANNED AERIAL VEHICLE AND PRESSURE CHAMBER FOR WATER STATUS IN VINEYARDS.....	72
5.1. REFERENCIA COMPLETA Y FACTOR DE IMPACTO.....	72
<i>Referencia completa</i>	72
<i>Factor de impacto y categorización de la publicación</i>	72
5.2. RESUMEN Y PUBLICACIÓN COMPLETA.	73
<i>Resumen</i>	73
<i>Abstract</i>	74
<i>Publicación completa</i>	74
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN GENERAL.	86
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	91
CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

Índice de figuras.

FIGURA 1. EVOLUCIÓN POBLACIÓN MUNDIAL (MIL MILLONES DE PERSONAS) DESDE 1960 HASTA LA ACTUALIDAD (FUENTE: [2]).	1
FIGURA 2. SERIE DE PRECIPITACIÓN ANUAL ACUMULADA (MM/L ²) EN ESPAÑA DESDE 1961 HASTA 2023 (FUENTE:[4]).	2
FIGURA 3. MILES DE HECTÁREAS DE PAÍSES CON MAYOR SUPERFICIE DE VIÑEDOS EN EL MUNDO EN 2023 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE [6]).	3
FIGURA 4. CARÁCTER DE LA PRECIPITACIÓN DE ESPAÑA EN EL AÑO 2023 (FUENTE: [10]).	5
FIGURA 5. EVOLUCIÓN MENSUAL DEL CONSUMO DE AGUA (EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO (ETC)) PARA VARIEDAD TEMPRANILLO OBTENIDOS PARA CEPAS ADULTAS EN CICYTEX-LA ORDEN (FUENTE: [20]).	6
FIGURA 6. PRECIPITACIÓN EFECTIVA MENSUAL (MM) DEL AÑO 2023 EN LA ESTACIÓN DE LA FINCA LA ORDEN BADAJOZ. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE [21]).	7
FIGURA 7. COMPONENTES DEL BALANCE DE AGUA DEL SUELO EN LA ZONA RADICULAR (FUENTE: [22]).	7
FIGURA 8. BALANCE DE AGUA EN LA ZONA RADICULAR DEL SUELO, COMPORTÁNDOSE ESTE COMO DEPÓSITO DE AGUA (FUENTE: [22]).	8
FIGURA 9. CICLO ANUAL DE VARIEDADES DE UVA PARA VINIFICACIÓN EN EXTREMADURA. DESARROLLO POR ESTACIONES DEL CRECIMIENTO VEGETATIVO Y REPRODUCTIVO (FUENTE: [20]).	11
FIGURA 10. VISTA DE FRACCIÓN HUMEDECIDA POR RIEGO DE LA SUPERFICIE DEL SUELO EN VIÑEDO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	19
FIGURA 11. DIAGRAMA DE FLUJO DE MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: [89]).	20
FIGURA 12. SENSOR FIELDSCOUT TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR) 350 (SPECTRUM TECHNOLOGIES, INC., AURORA, IL, USA) (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	22
FIGURA 13. VISTA AÉREA PARCELA EXPERIMENTAL VIÑA TINTA FINCA LA ORDEN-CICYTEX (FUENTE: [158]).	31
FIGURA 14. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE (CEA) A 0-0.50 M (SUPERFICIAL) Y A 0-1.50 M (PROFUNDA) DE LA PARCELA EXPERIMENTAL DE VIÑEDO DE FINCA LA ORDEN CICYTEX (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	33

FIGURA 15. CEPAS DE GARNACHA TINTA CON RIEGO CON GOTEO SUPERFICIAL ELEVADO SUJETO CON ALAMBRE (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	34
FIGURA 16. DISTRIBUCIÓN DE BLOQUES Y TRATAMIENTOS EN LA PARCELA DE VIÑEDO EXPERIMENTAL DE LA FINCA LA ORDEN CICYTEX (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	35
FIGURA 17. PLANTILLA DE CARTÓN FORRADA CON PLÁSTICO EN PROCESO DE ELABORACIÓN PARA MEDIDAS DE FRACCIÓN HÚMEDA DE SUELO CON SENSOR TDR (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	36
FIGURA 18. DIMENSIONES DE PLANTILLA (M) UTILIZADA PARA MEDIR FRACCIÓN HUMEDECIDA DE SUELO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	36
FIGURA 19. SENSOR FIELDSCOUT TDR 350 (SPECTRUM TECHNOLOGIES, INC., AURORA, IL, USA) MIDIENDO EN CAMPO LA FRACCIÓN HUMEDECIDA (FW) DEL SUELO POR CADA TRATAMIENTO DE RIEGO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	37
FIGURA 20. INTERFAZ INICIAL DEL MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE [86,87,167]).	38
FIGURA 21. INTERFAZ DE DATOS DE SUELO DE MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC PARA EL CÁLCULO DEL AGUA TOTAL DISPONIBLE (TAW) (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE [86,87,167]).	39
FIGURA 22. INTERFAZ DE DATOS DE CAPA EVAPORABLE DE MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC PARA EL CÁLCULO DEL AGUA EVAPORABLE TOTAL (TEW) Y AGUA FÁCILMENTE EVAPORABLE (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE [86,87,167]).	40
FIGURA 23. INTERFAZ INICIAL DE DATOS DE CLIMA DE MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE [86,87,167]).	41
FIGURA 24. INTERFAZ PARA GENERACIÓN DE EXCEL DE INTRODUCCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS DEL MODELO SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE [86,87,167]).	42
FIGURA 25. INTERFAZ DE GENERACIÓN DE ESTACIÓN CLIMÁTICA EN BASE DE DATOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE [86,87,167]).	42
FIGURA 26. INTERFAZ DE ENTRADA DE ETAPAS DE CRECIMIENTO, PROFUNDIDAD DE RAÍZ, ALTURA Y P-FRACTION DE CULTIVO DEL MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE: [86,87,167]).	43
FIGURA 27. INTERFAZ DE ENTRA DE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (LAI) DE CULTIVO PARA AJUSTE DE COBERTURA DE SUELO EN MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE: [86,87,167]).	44

FIGURA 28. INTERFAZ DE ENTRADA DE DATOS PARA COEFICIENTES DE CULTIVO BASAL (KCB) Y SU AJUSTE EN EL MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE: [86,87,167]).	45
FIGURA 29. INTERFAZ DE ENTRADA DE LAI PARA AJUSTE DE COEFICIENTE BASAL DE CULTIVO (KCB) A LA DENSIDAD REAL DE CULTIVO (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE: [86,87,167]).	46
FIGURA 30. INTERFAZ DE DATOS DE RIEGO ESPECÍFICO DEL USUARIO PARA TRATAMIENTO T03 MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE: [86,87,167]).	47
FIGURA 31. INTERFAZ DE DATOS DE RIEGO ESPECÍFICO DEL USUARIO PARA TRATAMIENTO T07 MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE: [86,87,167]).	48
FIGURA 32. INTERFAZ DE DATOS DE RIEGO ESPECÍFICO DEL USUARIO PARA TRATAMIENTO T15 MODELO DE SIMULACIÓN SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE: [86,87,167]).	49
FIGURA 33. INTERFAZ DE COMBINACIÓN DE DATOS E INICIO DE SIMULACIÓN DE MODELO SIMDUALKC (FUENTE: DATOS PROPIOS, SOFTWARE: [86,87,167]).	50
FIGURA 34. HOJAS DE VID ENVUELTAS EN PAPEL DE ALUMINO PREPARÁNDOSE PARA MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	51
FIGURA 35. MEDIDOR DE POTENCIAL HÍDRICO TIPO SCHOLANDER (SOIL MOISTURE CORP, SANTA BÁRBARA, CALIFORNIA, USA) (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	52
FIGURA 36. PORÓMETRO FOLIAR DECAGON SC-1 PARA MEDIDA DE CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA (DECAGON DEVICES, INC., PULLMAN, WA, USA) (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	52
FIGURA 37. VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (DRON) CON CÁMARA TÉRMICA INTEGRADA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	53
FIGURA 38. ORTOMOSAICO TÉRMICO CARGADO EN EL SOFTWARE QGIS 3.30.1. PARA SU PROCESAMIENTO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	55

Índice de tablas

TABLA 1. SUPERFICIE DEL VIÑEDO PLANTADA (HA) EN LAS DIFERENTES COMUNIDADES AUTÓNOMAS EN 2023 MEDIANTE REGADÍO, SECANO, TOTAL, PORCENTAJE DE REGADÍO SOBRE TOTAL Y RENDIMIENTO (KG/HA) DE REGADÍO Y SECANO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DE ENCUESTA SOBRE SUPERFICIES Y RENDIMIENTOS DEL MINISTERIO [9]).	4
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

TABLA 2. COEFICIENTES DE CULTIVOS (KC) POR MESES PARA VARIEDADES DE UVA PARA VINIFICACIÓN, PARA PRODUCCIÓN Y PARA CALIDAD, OBTENIDO PARA CEPAS ADULTAS EN LA FINCA LA ORDEN (FUENTE: [20])..... 9

TABLA 3. VALORES DE POTENCIAL HÍDRICO DE HOJA A MEDIO DÍA (BARES) RECOMENDACIONES ORIENTATIVAS DE VIÑEDO DE FINCA LA ORDEN CICYTEX (FUENTE: [20]). 23

TABLA 4. VALORES DE POTENCIAL HÍDRICO DE TALLO A MEDIO DÍA (BARES) RECOMENDADOS PARA UTILIZAR TÉCNICA DE POTENCIAL HÍDRICO PARA CONTROL DE OBJETIVO AGRONÓMICO PERSEGUIDO EN VIÑA (FUENTE: [20]). 24

* Figuras y tablas de artículos científicos formato independiente con numeración dentro del propio artículo científico.

Siglas.

	<u>ESPAÑOL</u>	<u>INGLÉS</u>
SAU	Superficie Agraria Útil	Useful Agricultural Area
TAW	Agua Total Disponible	Total Available Water
TEW	Agua Total Evaporable	Total Evaporable Water
REW	Agua Fácilmente Evaporable	Readily Evaporable Water
ETo	Evapotranspiración de Referencia	Reference Evapotranspiration
Fw	Fracción Humedecida del suelo	Wetted Soil Fraction
TDR	Reflectometría de Dominio del Tiempo	Time Domain Reflectometry
fc	Fracción de cobertura de la superficie del suelo por el cultivo	Fraction of soil surface coverage by the crop
LAI	Índice de Área Foliar	Leaf Area Index
PRD	Secado Parcial de la Zona Radicular	Partial Root Zone Drying

Fr	Función de Sensibilidad Estomática	Stomatic Sensitivity Function
UAV	Vehículo Aéreo no Tripulado o Dron	Unmanned Aerial Vehicle or Drone
CWSI	Índice de Estrés Hídrico del Cultivo	Crop Water Stress Index
RGB	Rojo, Verde, Azul (reflectancia)	Red, Green, Blue (reflectance)
NIR	Infrarrojo Cercano (reflectancia)	Near Infrared (reflectance)
NDVI	Índice de Vegetación de Diferenciación Normalizada	Normalised Differentiation Vegetation Index
QGIS	Sistema de Información Geográfica Cuántico	Quantum Geographic Information System
LIDAR	Detección y Medición de Luz	Light Detection and Ranging
CEa	Conductividad Eléctrica aparente	Apparent Electrical Conductivity
CEe	Conductividad Eléctrica de extracto de suelo	Electrical Conductivity of soil extract

GPS	Sistemas de Posicionamiento Global	Global Positioning System
FOV	Campo de Visión	Field of Vision
GSD	Distancia de Muestreo de Suelo	Ground Sampling Distance
RDI	Riego Deficitario Controlado	Regulated Deficit Irrigation
RHmin	Humedad Relativa Mínima	Minimum Relative Humidity
u_2	Velocidad Media del Viento	Mean Wind Speed
θ_{FC}	Capacidad de Campo	Field Capacity
θ_{WP}	Punto de Marchitez	Wilting Point
Z_r	Profundidad Efectiva de la Zona Radicular	Effective Root Zone Depth
ETc	Evapotranspiración de Cultivo	Crop Evapotranspiration
Kcb	Coeficiente de Cultivo Basal	Basal Crop Coefficient
Ke	Coeficiente de evaporación	Evaporation coefficient

p	Fracción de Agotamiento al Inicio del Estrés	Fraction of Depletion at Stress Starting Point
ML	Multiplicador de fc para máxima ETc	fc multiplier for maximum ETc
h	Altura de Cultivo	Crop Height
IoT	Internet de las Cosas	Internet of Things
DSS	Sistema de Soporte de Decisiones	Decision Support System
TSEB	Modelo de balance de energía de dos fuentes	Two-Source Energy Balance

*Siglas de artículos científicos independientes dentro del propio artículo científico.

Resumen

La disponibilidad de agua en un viñedo es un factor limitante en zonas áridas y semiáridas. Esta disponibilidad de agua en el viñedo afecta a la calidad y a la producción obtenida. Es por esto por lo que se considera fundamental hacer un uso eficiente de los recursos hídricos. Se han realizado estudios previos en cuanto a cantidad de agua y etapa de aplicación, sin embargo, en cuanto al riego no se conoce una investigación clara o tendencia en cuanto al momento exacto de aplicación, es decir, qué frecuencia de riego llevar a cabo. Este valor puede verse afectado por el tipo de cultivo, clima, suelo o riego de cada parcela. Las nuevas tecnologías como modelos de simulación y sensores pueden ayudar a evaluar estas estrategias agronómicas, por lo que se considera eficiente el estudio de la viabilidad de estas nuevas herramientas.

Debido a esto, el objetivo principal de esta tesis es analizar la viabilidad de distintas tecnologías para la evaluación del efecto de diferentes estrategias agronómicas, para llevar a cabo un riego inteligente. Para ello, se contempla evaluar la información base proporcionada por un modelo de simulación con diferentes sensores que permiten tomar medidas de campo. En el Capítulo 3, se selecciona y adapta un modelo de simulación de cultivo para viñedo denominado SIMDuaKc. Además, en este capítulo se pone en marcha diferentes tecnologías con sensores relacionadas con el uso hídrico en viñedo, como son las medidas de sensores de potencial hídrico, de conductancia estomática, de producción y de temperatura en un vehículo aéreo no tripulado (UAV) o dron. Una vez descrito como se utilizan estas tecnologías, en el capítulo 4, se ajusta el modelo de simulación con medidas reales de campo de fracción húmeda, con sensor tipo Time Domain Reflectometry, para el cálculo de evapotranspiración dual, separando evaporación y transpiración y comparando estos resultados de diferentes estrategias agronómicas con datos de sensores de campo y analizando el efecto sobre el rendimiento. Además de la utilización de estos sensores, en el Capítulo 5 se compara la técnica más utilizada tradicionalmente con una técnica moderna. Se comprueba la viabilidad técnica de diferentes sensores, como cámara térmica en vehículo aéreo no tripulado y sensores de potencial hídrico, para monitorizar y analizar el efecto de diferentes estrategias agronómicas en la eficiencia hídrica del viñedo.

La selección del modelo SIMDualKc ha permitido adaptar correctamente este modelo al cultivo del viñedo, identificando que cuando se selecciona el riego por goteo, no se modifica la fracción humedecida de suelo, independientemente de la cantidad y frecuencia de riego aplicada, abriendo una posibilidad de ajuste de este modelo con una fracción húmeda de campo real. Para este ajuste ha sido eficaz el sensor FieldScout Time Domain Reflectometry (TDR) 350 junto a una plantilla de elaboración propia. Sensores como cámara de presión

Scholander para medida de potencial hídrico y porómetro foliar Decagon SC-1 para medida de conductancia estomática permitieron ajustar y comparar correctamente los resultados obtenidos en la simulación con el modelo SIMDualKc. La utilización de una cámara térmica integrada en un vehículo aéreo no tripulado o dron junto a la cámara de presión tipo Scholander para evaluar el potencial hídrico, permitió de manera eficiente registrar datos de la parcela experimental para analizar el efecto de las estrategias agronómicas. La fracción humedecida del modelo se ajustó correctamente, introduciendo en el modelo el valor exacto de fracción húmeda observada en campo, que fue mayor cuanto menor era la frecuencia y mayor era la cantidad de cada riego. Con la fracción húmeda ajustada se observaron pérdidas de evaporación según el modelo SIMDualKc, el tratamiento con mayores pérdidas fue T07 (riego cada semanal), seguido de T15 (riego quincenal) y T03 (dos riegos por semana), encontrándose todas dentro del intervalo de evaporaciones encontradas en investigaciones previas. En cuanto a la transpiración obtenida con el modelo SIMDualKc, el tratamiento con menor transpiración fue T07, seguido de T15 y T3, coincidiendo con las medidas de conductancia estomática, presentando el caso más desfavorable para T07 y, sin embargo, sin mostrar una clara diferencia entre T07 y T15. Las diferencias encontradas entre evaporación y transpiración no se manifiestan en el rendimiento, sin encontrar diferencias significativas en la producción entre las diferentes frecuencias de riego. Los resultados de esta investigación junto a investigaciones previas no demuestran una clara tendencia en cómo afectan las frecuencias de riego, mostrando gran variabilidad según la variedad de cultivo, las condiciones climatológicas, tipo de suelo o diferentes estrategias de riego en cuanto a cantidad y frecuencia.

Esta variabilidad anima a conocer las condiciones locales de cada parcela, utilizando sensores como cámara térmica en vehículo aéreo no tripulado o dron o cámaras de presión tipo Scholander para potencial hídrico. La cámara térmica encontró diferencias entre tratamientos de riego y sin riego en una fecha y entre tratamientos sin riego y tratamiento de riego cada 7 días con un riego antes de brotación en otra fecha, sin diferenciar entre el resto de los tratamientos. La cámara de presión tipo Scholander encontró diferencias entre tratamientos con y sin riego en todas las fechas, encontrando en una de las fechas diferencias entre una frecuencia alta (T03) más estresada, que con una frecuencia baja menos estresada (T15). En cuanto a la comparativa entre la información recogida por la cámara térmica y cámara de presión tipo Scholander se identifican varias correlaciones significativas, esto hace que puedan ser medidas complementarias, dependiendo sobre todo del número de medidas a tomar, siendo el potencial hídrico adecuado como muestra puntual para obtener muestras exactas de superficies menos representativas y la cámara térmica para obtener datos de superficies más extensas. Debido a que los resultados pueden ser muy variables

dependiendo de factores como localización, variedad de cultivo, datos de suelo o de clima, el modelo de simulación, así como los diferentes sensores utilizados en esta investigación, se consideran tecnologías viables para evaluar el efecto de diferentes decisiones agronómicas para un riego inteligente.

Abstract

The availability of water in a vineyard is a limiting factor in arid and semi-arid areas. This water availability in the vineyard affects the quality and production obtained. This is why it is considered essential to make efficient use of water resources. Previous studies have been carried out in terms of water quantity and application stage; however, as far as irrigation is concerned, there is no clear research or trend as to the exact moment of application, that is, what frequency of irrigation to carry out. This value can be affected by the type of crop, climate, soil, or irrigation of each plot. New technologies such as simulation models and sensors can help to evaluate these agronomic strategies, so it is considered efficient to study the feasibility of these new tools.

For this reason, the main objective of this thesis is to analyse the feasibility of different technologies for the evaluation of the effect of different agronomic strategies in order to carry out intelligent irrigation. For this reason, it is considered to evaluate the base information provided by a simulation model with different sensors that allow field measurements to be taken. In Chapter 3, a crop simulation model for vineyards called SIMDualKc is selected and adapted. In addition, this chapter implements different sensor technologies related to water use in vineyards, such as the measurement of water potential, stomatal conductance, yield, and temperature sensors in an unmanned aerial vehicle (UAV) or drone. Once described how these technologies are used, in chapter 4, the simulation model is adjusted with real field measurements of wet fractions with a Time Domain Reflectometry type sensor for the calculation of dual evapotranspiration, separating evaporation and transpiration, and comparing these results of different agronomic strategies with data from field sensors and analysing the effect on yield. In addition to the use of these sensors, Chapter 5 compares the most traditionally used technique with a modern technique. The technical feasibility of different sensors, such as thermal camera on unmanned aerial vehicle and water potential sensors, to monitor and analyse the effect of different agronomic strategies on the water efficiency of the vineyard is tested.

The selection of the SIMDualKc model has allowed us to correctly adapt this model to vineyard cultivation, identifying that when drip irrigation is selected, the soil wetting fraction is not modified, regardless of the amount and frequency of irrigation applied, opening up the possibility of adjusting this model with a real field wetting fraction. For this adjustment, the FieldScout Time Domain Reflectometry (TDR) 350 sensor and a self-developed template have been effective. Sensors such as the Scholander pressure chamber for measuring water potential and the Decagon SC-1 leaf porometer for measuring stomatal conductance made it possible to correctly adjust and compare the results obtained in the simulation with the

SIMDualKc model. The use of a thermal camera integrated in an unmanned aerial vehicle or drone together with the Scholander type pressure chamber to evaluate the water potential made it possible to efficiently record data from the experimental plot to analyse the effect of the agronomic strategies. The wetting fraction of the model was correctly adjusted by entering the exact value of the wetting fraction observed in the field into the model, which was higher the lower the frequency and the higher the amount of each irrigation. With the adjusted wet fraction, evaporation losses were observed according to the SIMDualKc model; the treatment with the highest losses was T07 (weekly irrigation), followed by T15 (fortnightly irrigation) and T03 (two irrigations per week), all within the range of evaporations found in previous research. Regarding the transpiration obtained with the SIMDualKc model, the treatment with the lowest transpiration was T07, followed by T15 and T3, coinciding with the measurements of stomatal conductance, with the most unfavourable case for T07 and, nevertheless, without showing a clear difference between T07 and T15. The differences found between evaporation and transpiration do not show up in the yield, with no significant differences in production between the different irrigation frequencies. The results of this research, together with previous investigations, do not show a clear trend in how irrigation frequencies affect crops, showing great variability according to crop variety, weather conditions, soil type, or different irrigation strategies in terms of quantity and frequency.

This variability encourages knowing the local conditions of each plot using sensors such as a thermal camera in an unmanned aerial vehicle or drone or Scholander-type pressure chambers for water potential. The thermal camera found differences between irrigated and non-irrigated treatments on one date and between non-irrigated treatments and treatment irrigation every 7 days with an irrigation before sprouting on another date, without differentiating between the rest of the treatments. The Scholander type pressure chamber found differences between treatments with and without irrigation on all dates, finding on one of the dates differences between a higher frequency (T03) more stressed and a lower frequency less stressed (T15). As for the comparison between the information collected by the thermal camera and the Scholander type pressure chamber, several significant correlations were identified, which means that they can be complementary measurements, depending above all on the number of measurements to be taken, with the water potential being suitable as a point sample to obtain exact samples of less representative surfaces and the thermal camera to obtain data from more extensive surfaces. As the results can be highly variable depending on factors such as location, crop variety, soil, or climate data, the simulation model, as well as the different sensors used in this research, are considered viable technologies to evaluate the effect of different agronomic decisions for smart irrigation.

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Importancia del agua en la agricultura y en el viñedo.

La población mundial se encuentra en continuo crecimiento (Figura 1). Pasando de 3000 millones de personas en 1960, llegando a los 6140 millones de personas en el año 2000 y a 8020 millones de personas en el año 2023. Se espera que esto siga ocurriendo, estimándose que la población mundial aumente unos 2000 millones de individuos en los próximos treinta años, alcanzando los 9700 millones aproximadamente en 2050 y a los 10400 millones actualmente para mediados de 2080 [1,2].

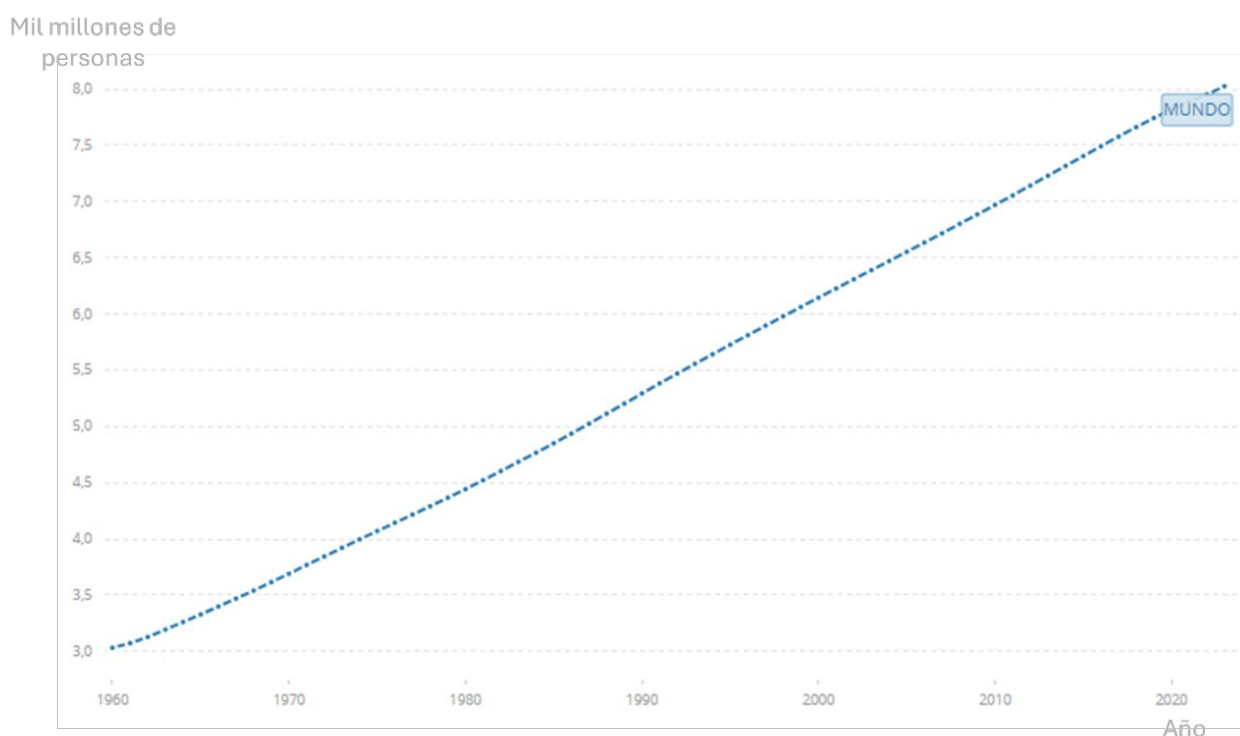


Figura 1. Evolución población mundial (mil millones de personas) desde 1960 hasta la actualidad (Fuente: [2]).

En España, en las últimas décadas se revela un escenario cada vez más cálido y seco, con un incremento de la radiación solar, de la demanda evaporativa y temperaturas. Por otro lado, la humedad relativa y la precipitación media anual disminuyen, lo que presenta una variabilidad espacial y estacional sustancial [3].

En cuanto a la precipitación, en la Figura 2 se puede observar cómo, en España, país donde se desarrollan los ensayos de esta tesis doctoral, las precipitaciones son cada vez más irregulares [4], lo que proporciona importancia fundamental a la gestión de los recursos hídricos para distribuirlos de manera más eficiente posible.

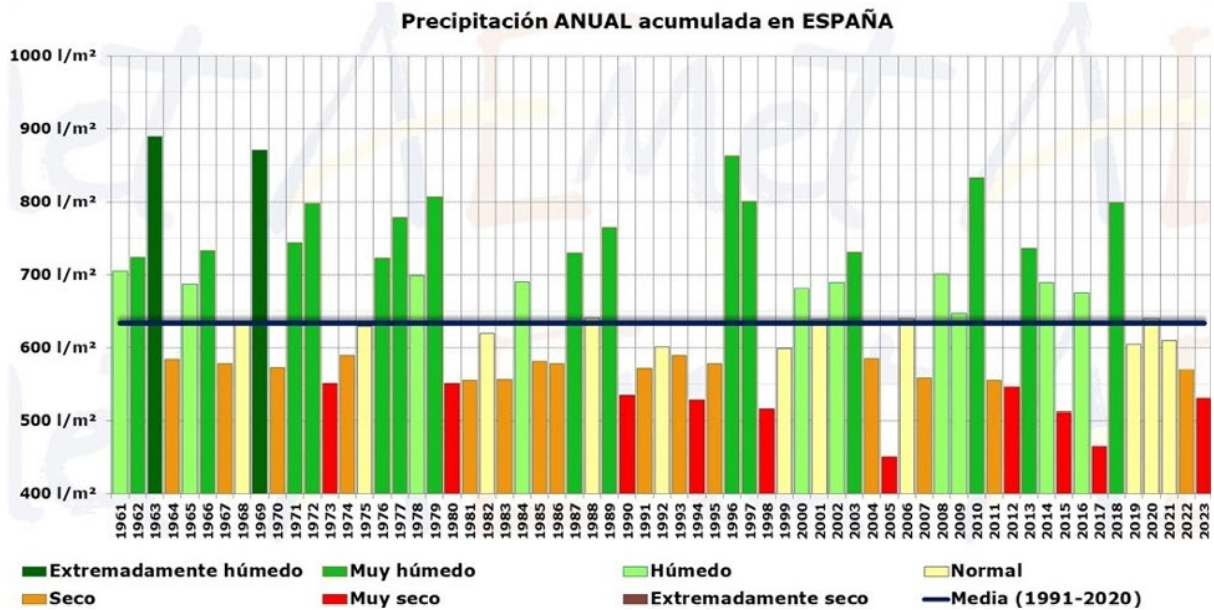


Figura 2. Serie de precipitación anual acumulada (mm/l²) en España desde 1961 hasta 2023 (fuente:[4]).

Además, los últimos datos recogidos en 2023, lo muestran como el sexto año con menos precipitación desde el inicio de la serie histórica y el cuarto más seco del siglo XXI, desde marzo de 2023 y durante el resto del año se evolucionó hacia una sequía de larga duración, al considerar 36 meses previos. Este tipo de sequía puede afectar a la economía de la sociedad y limitar el abastecimiento. También en este año se muestra la escasez de precipitaciones en primavera, que indica también la irregularidad de los eventos de precipitación. Además, en provincias como Badajoz (donde se desarrolla esta tesis doctoral), Ciudad Real, Cuenca, Guadalajara, Barcelona y Girona o comunidades autónomas como Andalucía (excepto Almería), se producen descensos estadísticamente significativos de la tendencia de la precipitación [4].

Estas irregularidades y tendencias asociadas al cambio climático hacen necesario establecer sistemas o modelos que permitan ajustar las necesidades del cultivo a cada momento y establecer mecanismos que automaticen la toma de decisiones y el apoyo a los agricultores. Por ejemplo, en la zona extremeña de regadío de Tierra de Barros se realiza para obtener un riego de 2500 m³/ha lo que obliga a realizar manejos de riego para saber cuándo aplicar la dosis de agua necesaria [5].

En cuanto al cultivo de la vid, en 2023, España es el país con mayor superficie dedicada a viñedo del mundo. Como se observa en la Figura 3, en 2023 cuenta con 945 miles de hectáreas dedicada al cultivo del viñedo [6].

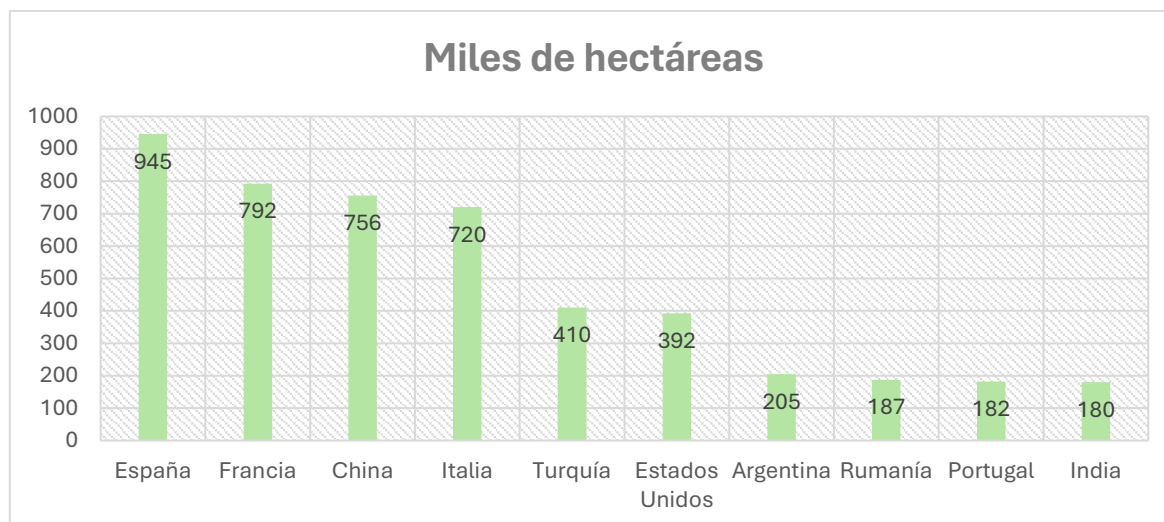


Figura 3. Miles de hectáreas de países con mayor superficie de viñedos en el mundo en 2023 (fuente: elaboración propia a partir de datos de [6]).

A nivel nacional, el viñedo es uno de los cultivos más importantes. En 2022, ocupa el tercer puesto dentro de los cultivos leñosos, con respecto al porcentaje de la Superficie Agraria Útil (SAU) con un 3,6 %. Dentro de esta superficie del viñedo, la mayor parte de la producción está destinada para vinificación. En 2022, un 98,36% fueron las hectáreas dedicadas a uva para vino y un 1,64% las hectáreas dedicadas a uva para mesa [7].

El total de las hectáreas dedicadas al cultivo del viñedo en 2022, corresponde a un 13% del total mundial. La producción media anual de vino es de 46,4 millones de hectolitros en 2022, siendo el tercer productor a nivel mundial. La actividad de la cadena de valor vitivinícola supone 20330 millones de euros de valor añadido, el 1,9% del PIB español. Existen en España 4347 bodegas exportadoras de vino en 2022, además, los vinos se venden en 189 países de todo el mundo, siendo los principales mercados Alemania, Estados Unidos, Reino Unido y Francia. España es el primer exportador mundial en volumen, con 2153 millones de toneladas en 2022, equivalentes a 3423 millones de euros y los terceros mayores exportadores del mundo en cuanto a valor, con 2914 millones de euros en 2021. Tres de cada cinco botellas de vino que se comercializan en el mundo proceden de la Unión Europea. España produce el 25% de la producción de vino en Europa. El sector vitivinícola genera 363980 empleos en España. Además, se elabora vino en las 17 comunidades autónomas siendo esto un aspecto importante para luchar frente al vaciado de zonas menos pobladas [8].

A nivel regional, en la Tabla 1, se muestra la superficie dedicada al cultivo del viñedo de cada comunidad autónoma en 2023. Se puede observar cómo existe una gran variación de unas comunidades autónomas a otras, debido a su extensión y a las condiciones edafoclimáticas. Además, se muestran las diferencias que hay de superficies de secano y regadío entre comunidades autónomas, así como los rendimientos obtenidos [9].

Tabla 1. Superficie del viñedo plantada (ha) en las diferentes comunidades autónomas en 2023 mediante regadío, secano, total, porcentaje de regadío sobre total y rendimiento (kg/ha) de regadío y secano (Fuente: elaboración propia a partir de datos de encuesta sobre superficies y rendimientos del ministerio [9]).

Comunidad autónoma	Total viñedo regadío (ha)	Total viñedo secano (ha)	Total viñedo (ha)	% Regadío sobre el total	Rendimiento regadío (kg/ha)	Rendimiento secano (kg/ha)	Diferencia entre rendimiento regadío y secano (kg/ha)
CASTILLA-LA MANCHA	236.063,30	215.061,03	451.124,33	52,33	9.892,05	4.568,80	5.323,25
CATALUÑA	9.552,18	48.129,81	57.681,99	16,56	8.082,84	3.482,29	4.600,55
R.DE MURCIA	11.229,92	14.324,35	25.554,26	43,95	6.488,69	2.310,54	4.178,14
CASTILLA-LEON	28.715,84	48.018,49	76.734,33	37,42	7.057,52	4.044,68	3.012,84
EXTREMADURA	31.538,57	51.463,53	83.002,10	38,00	4.209,70	1.718,52	2.491,18
MADRID	635,51	7.891,46	8.526,97	7,45	5.000,00	2.805,24	2.194,76
BALEARES	2.563,96	521,51	3.085,47	83,10	5.096,34	3.083,54	2.012,80
ARAGON	11.597,05	23.356,04	34.953,09	33,18	4.979,74	3.406,26	1.573,48
NAVARRA	10.829,50	7.276,59	18.106,09	59,81	7.850,86	6.546,17	1.304,69
ANDALUCIA	2.352,76	20.119,51	22.472,27	10,47	5.355,07	4.567,07	788,01
LA RIOJA	23.410,94	30.079,13	53.490,07	43,77	7.090,61	6.797,90	292,71
C.VALENCIANA	24.206,76	39.188,36	63.395,12	38,18	4.933,29	4.909,75	23,55
PAIS VASCO	1.658,71	12.235,84	13.894,55	11,94	0,00	0,00	0,00
P.DE ASTURIAS		2,72	2,72	0,00	0,00	0,00	0,00
CANARIAS	3.170,25	4.433,69	7.603,94	41,69	5.125,78	5.245,14	-119,36
CANTABRIA		21,14	21,14	0,00	0,00	4.587,23	-4.587,23
GALICIA	1.554,60	23.911,39	25.465,99	6,10	838,52	9.529,23	-8.690,71

Para interpretar mejor los datos de la Tabla 1, a continuación, se muestra el carácter de la precipitación del territorio nacional del último año completo del que se tienen datos (Figura 4).

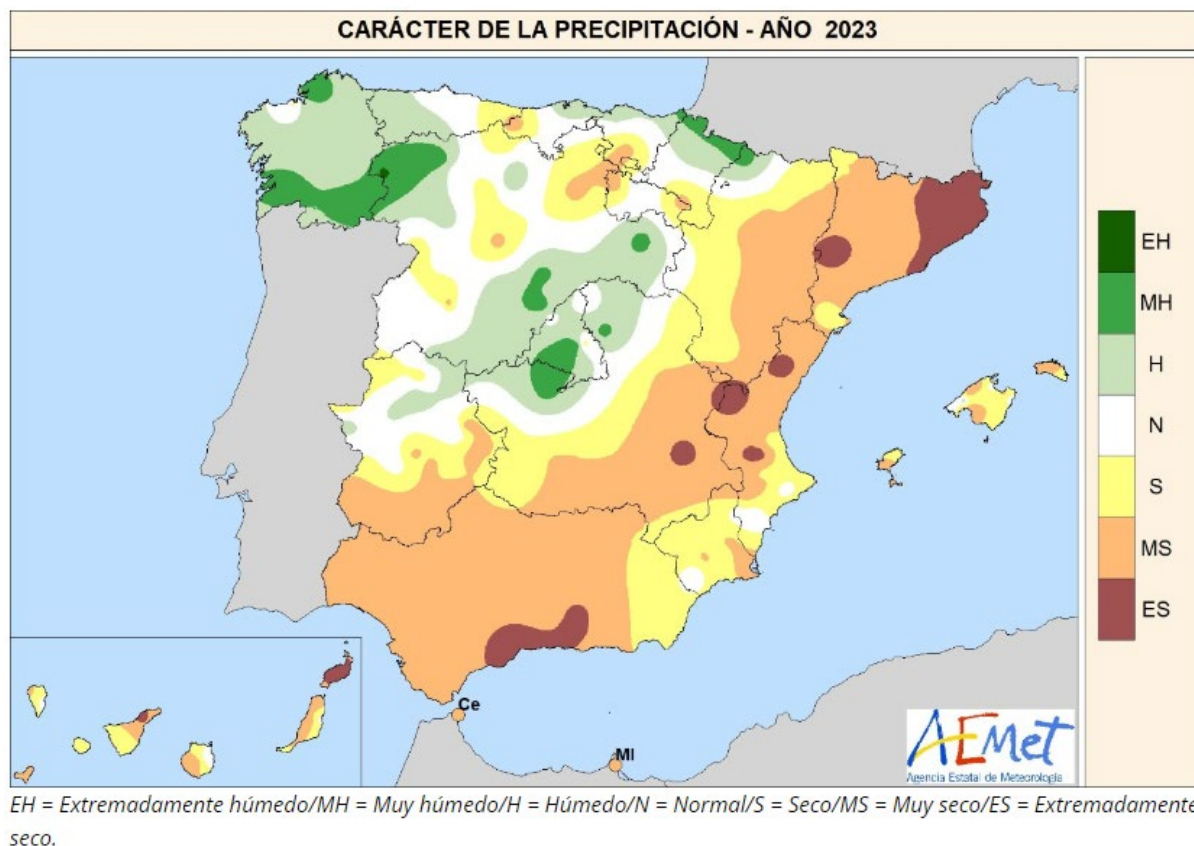


Figura 4. Carácter de la precipitación de España en el año 2023 (Fuente: [10]).

Como se puede observar en la Tabla 1, quitando baleares que tiene una transformación de sus tierras a regadío de un 83,10%, el resto de comunidades que cuentan con regadío se encuentra únicamente entre el 40-60% de sus tierras. Esto puede hacer que, si se observa la diferencia entre el rendimiento en seco y en regadío de comunidades como Castilla la Mancha, Cataluña, Región de Murcia, Castilla y León o Extremadura, tienen grandes diferencias de rendimientos entre tierras con riego y sin riego, coincidiendo como se observa en la Figura 4, con climas secos, muy secos o extremadamente secos fundamentalmente, lo que hace ver la importancia de valorar un riego eficiente y de precisión para aportar el agua que necesita el cultivo y mejorar los rendimientos para ser más rentables, adaptándose al medio ambiente. Teniendo en cuenta esto, el cultivo del viñedo, uno de los principales retos a los que se enfrenta hoy en día es la escasez de agua [11].

La disponibilidad de agua en el viñedo es un factor limitante para la productividad en zonas áridas o semiáridas, por lo tanto, es fundamental mejorar la eficiencia en el uso del agua de este cultivo [12,13].

La disponibilidad de agua en los viñedos afecta a parámetros como la acumulación de azúcar y en niveles severos, perjudica a la calidad del vino [13,14]. La composición de las uvas para la producción de vino depende del estado hídrico que tiene el viñedo durante la temporada de crecimiento [15].

Por lo tanto, para adoptar la estrategia de riego más adecuada para la vid, es fundamental controlar el estado hídrico de la vid durante toda la campaña [14,16,17].

Además, el crecimiento vegetativo, el rendimiento y la composición de las bayas se ven afectados por la heterogeneidad espacial de los viñedos [18,19]. Por lo que se considera de gran importancia el estudio de la eficiencia hídrica con las condiciones de cada parcela y cultivo.

1.2. El suelo como un depósito de agua.

Las necesidades hídricas de un cultivo de vid en Extremadura son diferentes según el momento del año (Figura 5). Estas necesidades, según las precipitaciones mostradas en la Figura 6, hace que en situaciones de secano o de baja aplicación de riego, el agua puede ser insuficiente y el suelo juega un papel fundamental como depósito de agua para mantener el agua disponible para el cultivo [20,21].

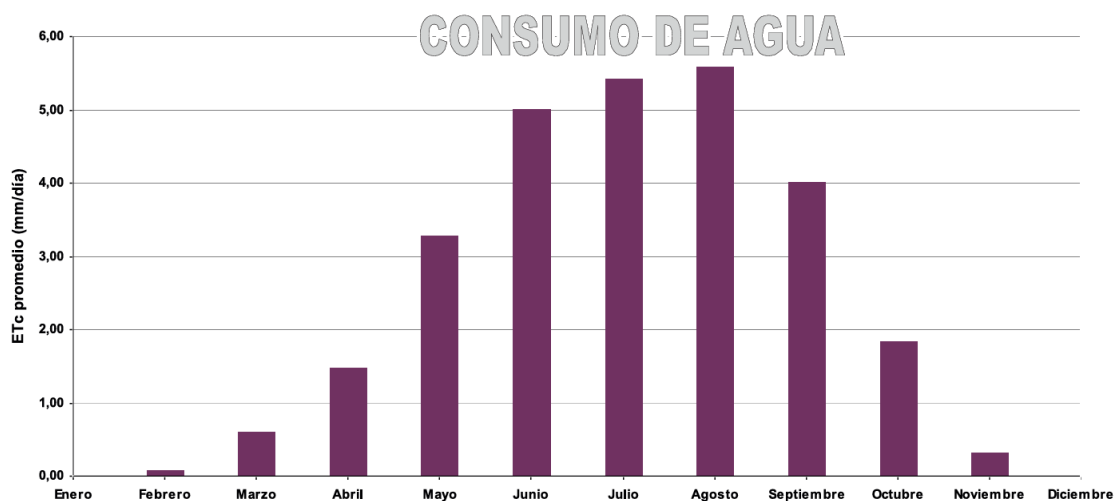


Figura 5. Evolución mensual del consumo de agua (Evapotranspiración de cultivo (ETc)) para variedad tempranillo obtenidos para cepas adultas en CICYTEX-La Orden (Fuente: [20]).

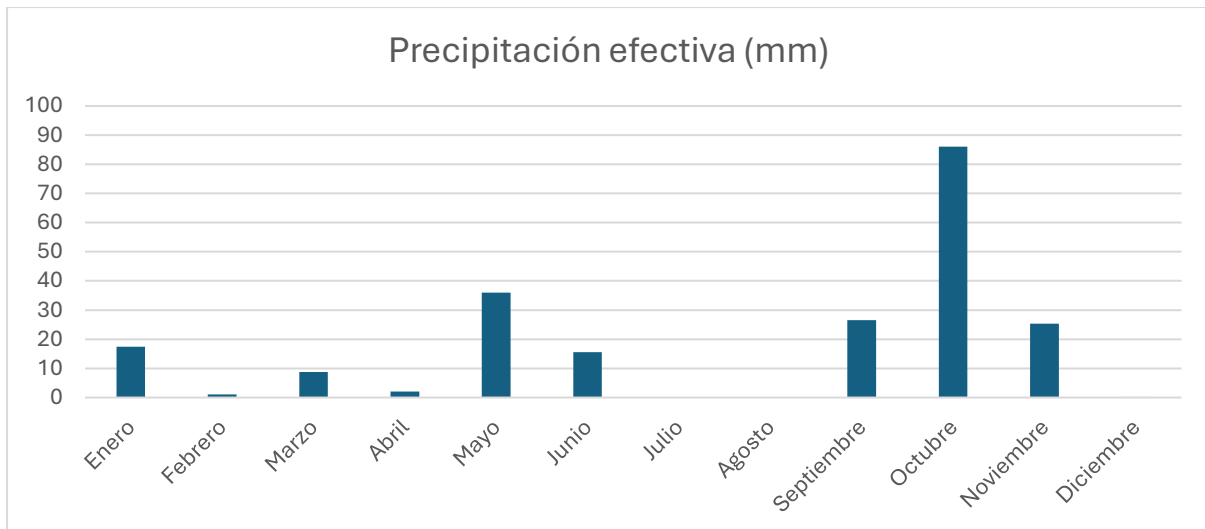


Figura 6. Precipitación efectiva mensual (mm) del año 2023 en la estación de la Finca La Orden Badajoz. (Fuente: elaboración propia a partir de datos de [21]).

Como se muestra en las Figuras 5 y 6, en el caso del viñedo en Extremadura, hay que prestar especial interés en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, en los cuales las precipitaciones efectivas pueden ser insuficientes para cubrir las necesidades del cultivo, lo que hace necesario conocer el suelo como depósito de agua [20,21].

El suelo se comporta como un depósito de agua en el cual fluye agua hacia dentro y hacia fuera. En la Figura 7, se muestra el balance de agua que presenta un suelo en la zona radicular [22].

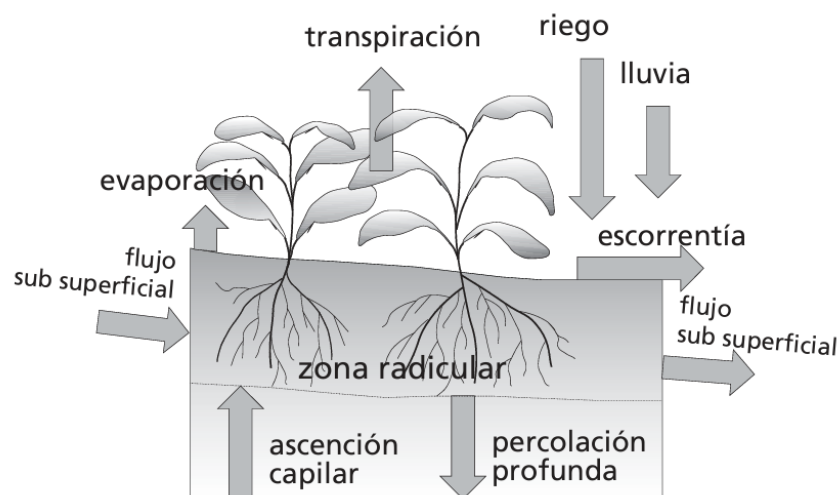


Figura 7. Componentes del balance de agua del suelo en la zona radicular (fuente: [22]).

Como se observa en la Figura 7. El riego y la precipitación proporcionan agua a la zona de las raíces. Parte de este agua puede perderse por escorrentía superficial y percolación profunda, la cual eventualmente puede recargar la capa freática.

El agua también puede ascender a la zona de las raíces por capilaridad desde la capa freática, o también puede ser transferida horizontalmente por flujo subsuperficial hacia dentro o salir hacia fuera de la zona radicular, sin embargo, estos valores de flujo subsuperficial hacia dentro y hacia fuera de forma horizontal pueden ser mínimos y no considerados excepto en casos de pendientes muy pronunciadas. Además, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática son difíciles de medir y pueden no considerarse en periodos cortos.

Es importante destacar que parte del agua de riego y precipitación se puede perder por evaporación directa del suelo y transpiración del cultivo, cuya suma se conoce como evapotranspiración del cultivo (ETc). En la Figura 8, se muestra el suelo como depósito de agua para simular como sería el balance de agua en la zona radicular [22].

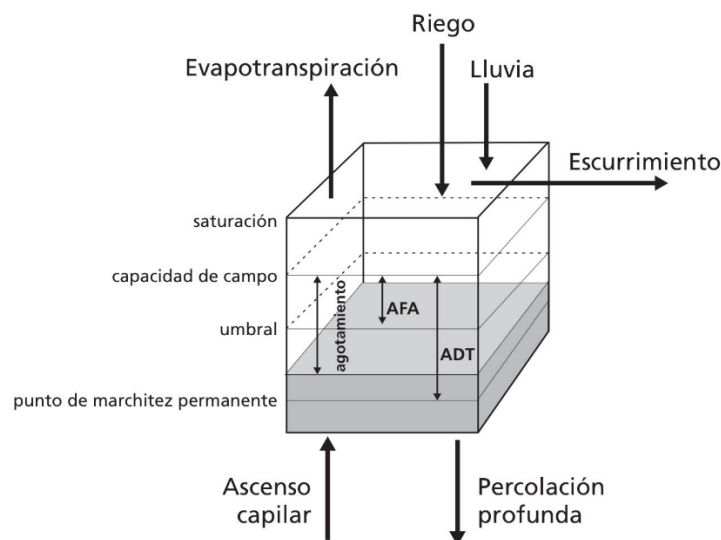


Figura 8. Balance de agua en la zona radicular del suelo, comportándose este como depósito de agua (Fuente: [22]).

Como se observa en la Figura 8, el flujo de agua comentado anteriormente, puede producir varias situaciones: saturación, cuando la cantidad de agua se encuentra por encima de la capacidad de campo, los poros están completamente cubiertos por agua; capacidad de campo, es cantidad de agua que el suelo es capaz de retener después de ser saturado y dejado drenar libremente evitando evapotranspiración y hasta que el potencial hídrico se estabiliza (tras 24 a 48 horas de la lluvia o riego); agotamiento, es la cantidad de agua perdida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente; punto de marchitez permanente, es el punto en el que el cultivo no puede extraer agua remanente, en este momento la extracción de agua es nula y es el contenido de humedad de suelo a partir del cual las plantas se marchitan permanentemente [22].

Es fundamental prestar atención a las necesidades hídricas de cada cultivo, es decir, conocer su ETc. La ETc es el resultado de multiplicar la evapotranspiración de referencia (ETo) por un coeficiente del cultivo (Kc) que puede depender de diferentes factores específicos del cultivo. La ETo es evapotranspiración de una superficie hipotética de césped verde, bien regado y de altura uniforme, que crece activamente y cubre completamente el suelo, depende de las condiciones meteorológicas y puede ser calculada por diferentes técnicas como el método de Penman-Monteith (FAO-56), método de Hargreaves-Samani, método de Blaney-Criddle, método de Thornthwaite, método de Makkink, método de Jensen-Haise o método de Turc, siendo la más común el método de Penman-Monteith. Esta ETo puede ser descargada a tiempo real de una estación agrometeorológica lo más cercana posible [21,22].

Para ver las necesidades de riego se puede obtener la ETo de una estación meteorológica cercana a partir de plataformas de descarga de datos agrometeorológicos [21] y posteriormente multiplicar por la Kc recomendada para el cultivo correspondiente, la cual ha sido estudiado para diferentes condicionantes [20,23]. En este caso, en la Tabla 2, se muestran valores de Kc estudiados para viñedo, por meses para variedades de uva para vinificación obtenido para cepas adultas en la Finca La Orden de Extremadura, además se observa como el coeficiente se ajusta en las columnas de la derecha, según si el objetivo de cultivo es destinado a producción o calidad [20].

Tabla 2. Coeficientes de cultivos (Kc) por meses para variedades de uva para vinificación, para producción y para calidad, obtenido para cepas adultas en la Finca La Orden (Fuente: [20]).

	Kc	Coeficiente recomendado	
		Producción	Calidad
Abril	0,25	0,20	0
Mayo	0,55	0,40	0
Junio	0,85	0,60	0,15
Julio	0,85	0,60	0,15
Agosto	0,95	0,40	0,30
Septiembre	0,90	0,35	0,30
Octubre	0,80	0,30	0,25

Como se observa en la Tabla 2, la Kc para plantas desarrolladas sin limitaciones hídricas en Extremadura para variedades adultas conducidas en espaldera varía según el mes, siendo mayor en los meses en los que la precipitación efectiva es menor y la necesidad de cultivo mayor. Además, se muestra un valor recomendado de Kc para dos estrategias de

riego diferente, para buscar valores de producción y para buscar calidad [20], lo cual ha sido demostrado que puede conseguirse con un déficit hídrico controlado [16].

Existen ocasiones en las que interesa utilizar la técnica de coeficiente de cultivo dual, esta técnica consiste en calcular la ET_c , separando la evaporación y la transpiración de manera dual. La evaporación es el resultado de multiplicar la ET_o por un coeficiente de evaporación (K_e), mientras que la transpiración es el resultado de multiplicar la ET_o por un coeficiente de cultivo basal (K_{cb}). La evapotranspiración de cultivo consistiría, en la suma de la multiplicación de la $ET_o \times K_{cb}$ y la $ET_o \times K_e$, lo cual debe ajustarse para la mayor eficiencia posible [22].

Valores de K_{cb} han sido estudiados para diferentes estrategias y tipos de cultivo, demostrando que este valor puede variar según diferentes condicionantes [23]. Esto hace fundamental conocer la K_{cb} de cada parcela de estudio y también conocer la K_e , debido que será el agua que se pierde por evaporación y, por lo tanto, no puede ser utilizada por la planta, por lo que se considera importante utilizar esta técnica para minimizar este valor de K_e lo máximo posible, para utilizar el agua de riego de una manera eficiente, aplicando al cultivo lo que necesita en cada momento [22].

1.3. Efecto de diferentes estrategias de riego en el cultivo del viñedo.

La vid es una planta que tiene su origen en la cuenca mediterránea y Oriente Próximo, esto le proporciona una adaptación a temperaturas elevadas y una gran resistencia a la escasez de agua, aunque también puede vegetar en zonas con menos temperatura, pudiendo desarrollarse entre los paralelos de 50° LN y 50° LS [20].

La vid está bien adaptada a la escasez de agua debido a la profundidad y extensión de sus raíces y a los mecanismos de resistencia a la sequía como el control de apertura estomática [24] y el ajuste osmótico [25]. Aumentar la cantidad de agua que está disponible para la planta supone un cambio en la fisiología de esta [26,27], estos cambios afectan decisivamente a los procesos de fructificación y maduración de las uvas, así como las características de los vinos [28,29].

El viñedo es un cultivo que en ocasiones es capaz de resistir sin riego, con cantidades de agua únicamente proporcionada por la lluvia, de hecho, el riego estuvo prohibido en algunos países europeos hasta finales de la década de 1990, en España en concreto hasta 1996 [30], a partir de aquí se han realizado múltiples estudios sobre diferentes estrategias de riego [11]. Sin embargo, la disponibilidad de agua se ha visto limitada por el cambio climático,

que ha impactado en la viticultura de los últimos años, como consecuencia del aumento de las temperaturas, las modificaciones en la distribución de las precipitaciones en el tiempo y un aumento de fenómenos extremos como sequías y olas de calor [31–33]. Esto le proporciona una gran importancia a la optimización de la gestión de agua en viñedo [11]

Saber cuándo y cuánta agua aplicar es fundamental para conseguir, por un lado, una gestión eficiente de este recurso natural cada vez más escaso y costoso y, por otro, mantener la rentabilidad de la explotación equilibrando la productividad y la calidad de la uva [34].

Una correcta aplicación del agua requiere un conocimiento preciso de la respuesta de la vid al estrés hídrico en sus diferentes estados fenológicos y para esto es necesario explicar las diferentes etapas del ciclo anual del viñedo en el lugar de estudio (Figura 9), para posteriormente explicar cuáles son los momentos claves a considerar para realizar las aplicaciones de agua mediante riego [20].

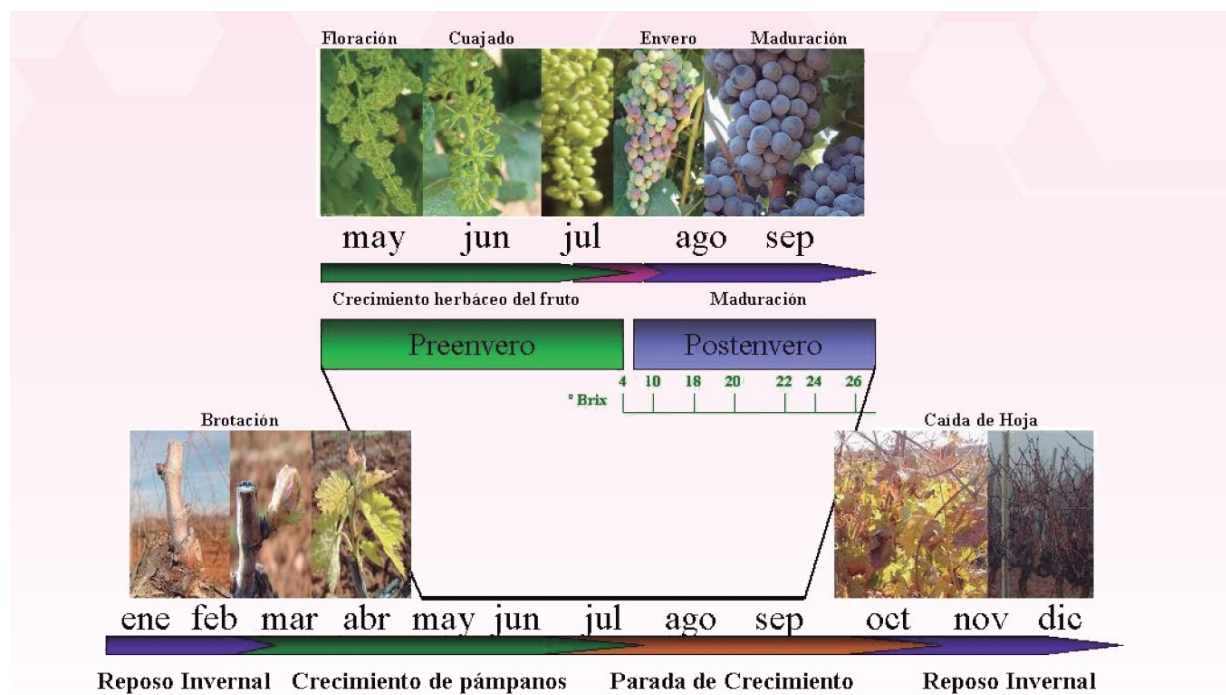


Figura 9. Ciclo anual de variedades de uva para vinificación en Extremadura. Desarrollo por estaciones del crecimiento vegetativo y reproductivo (Fuente: [20]).

Como se observa en la Figura 9, el ciclo anual del viñedo comienza con lloros que dan paso a la brotación, lo cual se produce entre marzo y abril en Extremadura, donde se desarrolla esta tesis doctoral. Esta brotación va seguida de una fase de desarrollo activo de brotes y pámpanos hasta que se para el crecimiento (julio). Cuando se para el crecimiento, se produce el agostamiento o lignificación y se convierte en sarmiento. El ciclo avanza cuando se caen las hojas produciéndose el reposo invernal. El desarrollo de la uva comienza con la

floración que se produce de forma escalonada en el mes de mayo, tiene lugar entre una y dos semanas, siendo este un periodo alta sensibilidad a la falta de agua. El cuajado, tiene una duración de una a dos semanas y es también muy sensible al déficit hídrico, afectando al número de flores cuajadas. El crecimiento de la baya comienza con una etapa de crecimiento rápido que dura de cinco a siete semanas según la variedad, la baya pasa después a una fase de crecimiento lento, donde apenas aumenta su peso, que dura de dos a cuatro semanas. Para terminar, el crecimiento de la baya se reactiva y el peso aumenta. Esta fase se inicia con el ablandamiento de la baya y posteriormente con el envero o cambio de color de las uvas visible en las variedades tintas. Con el cambio de color comienza la maduración y la acumulación de azúcares en las uvas, desciende la acidez y en la viña tinta comienza la formación y almacenamiento de sustancias colorantes y taninos. También la uva se almacena potasio en esta fase. El tiempo de duración de la maduración va a variar según la concentración de las diferentes sustancias en la baya que se verán afectadas a su vez por factores ambientales y las estrategias agronómicas [20].

Las dos estrategias de riego en el viñedo que han sido más estudiadas son el riego deficitario regulado o regulated deficit irrigation (RDI) y el secado parcial de la zona radicular o partial root-zone drying (PRD). En ambas estrategias, las aplicaciones de agua son solo un porcentaje de las necesidades totales de la vid, ya sea durante toda la temporada o solo durante algunas etapas del ciclo de crecimiento, con el objetivo de minimizar las reducciones de rendimiento y mejorar la composición de la uva [35,36].

El RDI es una estrategia de gestión del agua en la agricultura que consiste en reducir de manera controlada la cantidad de agua que es aplicada a un cultivo en determinadas etapas de su fenología. En general, el estrés hídrico produce una amplia gama de efectos, pero estos dependen de la etapa de desarrollo de la vid [31,37]. El manejo del estrés mediante RDI ha sido utilizado en áreas de clima cálido como una herramienta para mejorar la composición de las bayas y el vino en diferentes variedades de vid [38–46]. Además, recientemente se ha realizado una revisión y actualización de diferentes aplicaciones de RDI en viña donde se evalúa la eficiencia de esta estrategia [47]. Como se ha comentado anteriormente el RDI se centra en aplicaciones reguladas por debajo de la demanda total del cultivo en las diferentes etapas de la fenología. Teniendo en cuenta esto, a efectos del riego, el desarrollo de la baya se divide en dos periodos en función de su sensibilidad a la falta de agua [20].

El más sensible es el periodo que va desde floración hasta envero, es el periodo de mayor crecimiento vegetativo de la vid [20]. La aplicación de estrés hídrico durante este

periodo disminuye el crecimiento de los brotes y el área foliar de la vid [48]. El crecimiento vegetativo disminuye a medida que se produce el crecimiento y desarrollo de las bayas, de modo que el racimo se convierte en el principal consumidor de fotoasimilación disminuyendo lo que consumen los ápices vegetativos, que terminan deteniendo su crecimiento. La multiplicación y elongación de las células de las bayas disminuyen en respuesta al estrés hídrico temprano, produciendo bayas más pequeñas [49]. Este menor tamaño de las bayas se ha asociado con mayor calidad del vino como resultado del aumento de la relación piel/pulpa [50]. Sin embargo, también se ha demostrado que no solo es importante el tamaño de la baya sino el manejo que se realiza del cultivo [51]. Durante este periodo de preverano, el estrés hídrico produce cambios metabólicos en la baya, que se mantienen, aunque posteriormente este estrés disminuya [44,52]. La disponibilidad suficiente de agua durante este período es fundamental para lograr rendimientos significativos en dos cosechas debido a la inducción floral [53,54]. Por el contrario, la disponibilidad excesiva de agua durante este período temprano en el ciclo de crecimiento de la vid puede sobre estimular el crecimiento vegetativo, lo que puede conducir a copas excesivamente vigorosas y densas, aumentando el riesgo de enfermedades fúngicas [55].

Por otra parte, en el periodo postverano, el estrés hídrico tiene menor efecto sobre el desarrollo del área foliar siempre que el estrés de la vid no sea severo, ya que un estrés elevado produce senescencia prematura de las hojas y una limitación en el transporte de savia elaborada a los racimos y órganos de reserva [56]. En contraste, los efectos sobre la baya del estrés hídrico durante el postverano son mucho más variables, generando mayor discrepancia entre los resultados obtenidos [15,16,57]. No obstante, se puede generalizar que el estrés hídrico moderado, aumenta la calidad del cultivo al disminuir el tamaño de la baya y la acidez total pero aumenta el contenido de sólidos solubles y la concentración total de antocianinas y polifenoles [58].

Teniendo en cuenta esto, en ocasiones se han realizado riegos sin definir una estrategia adecuada. Antes de regar un viñedo se debe buscar el objetivo de cultivo, para evitar tener excesiva producción y poca calidad, o al contrario, si no es lo que se desea. Según lo comentado anteriormente, se puede distinguir entre dos estrategias de riego [20]:

Una estrategia de riego para calidad, consiste en sacrificar parte de la cosecha para conseguir una mejor la calidad de la uva, consiste en aplicar dosis limitantes de agua durante el periodo de preverano, de tal manera que la cantidad de agua para las raíces sea escasa durante las etapas más tempranas del desarrollo de la baya (aproximadamente 20% de las necesidades de la vid), en postverano la sensibilidad de las cepas a la falta de agua suele ser

menor, sin embargo se deben evitar sequías excesivas que comprometan la maduración de la uva (aproximadamente el 35% de las necesidades de la vid) [20].

Una estrategia de riego para equilibrar el agua aplicada y producción, se pretende priorizar el aumento del rendimiento productivo del viñedo frente a los componentes de la calidad de la baya. Consiste en aplicar dosis de agua poco limitantes (aproximadamente 70% de las necesidades) durante el periodo de preenvero, además así se favorece la inducción floral, que determina el número de racimos que se desarrollan el año siguiente. Durante el periodo postenvero el tamaño de la baya y la cantidad de cosecha es menos sensible al riego, entonces se puede disminuir el aporte de agua de riego (aproximadamente al 40% de las necesidades), sin embargo, el riego del preenvero habrá creado una gran vegetación que demandará agua en esta etapa postenvero [20].

La otra estrategia muy estudiada además del RDI, es el citado PRD, el cual consiste en alternar las zonas de riego, generalmente cada 15 o 20 días, con la mitad del sistema radicular mantenido sin regar y seco mientras la otra mitad recibe riego. El principal efecto del PRD en las vides es la producción de señales químicas en las raíces secas, que son transportadas a las hojas donde desencadenan una menor conductancia estomática [59].

Esta estrategia reduce la transpiración sin ningún efecto mayor en el crecimiento o productividad de la planta. Se han encontrado resultados positivos con respecto a controlar el crecimiento vegetativo excesivo y mejorar la calidad de la uva, al tiempo que contribuye a un ahorro de agua cercano al 50% sin perjudicar la producción de frutos [60–63]. También, se han encontrado mejores resultados que con riego convencional [64] y en diferentes texturas de suelos, tanto en suelos arenosos [61] como en suelos pesados y profundos [65,66]. Además, investigaciones recientes sobre PRD confirmaron, en dos tipos de suelo, la utilidad de esta estrategia de riego para ahorrar agua mientras se mantiene el rendimiento de la fruta y se mejora la calidad del vino a través de aumentos en los contenidos de polifenoles [63].

Sin embargo, otros estudios han establecido que el PRD no tuvo ningún efecto considerable en el rendimiento de la vid cuando se comparó con la misma cantidad de agua aplicada a través del riego convencional [67]. Además, una investigación llevada a cabo en un viñedo de Tempranillo sugirió que la cantidad de riego, más que el sistema de aplicación era el factor principal que influía en el rendimiento de la vid [66].

Otras técnicas que se están investigando recientemente son, el estudio del efecto de una estrategia de riego carbonatado, lo cual consiste en añadir dióxido de carbono al agua

de riego, esto hace que se altere el pH del suelo y mejore la absorción de nutrientes, de esta manera, se demostró que el riego carbonatado redujo la clorosis férrica que perjudica al cultivo del viñedo y, por lo tanto, mejora la eficiencia del riego y la calidad de la uva, como se ha visto en un viñedo Tempranillo en España [68]. Otra estrategia que se ha llevado a cabo es la aplicación de hongos micorrícicos arbusculares junto al riego, se ha estudiado que estos pueden mejorar la absorción de agua y de nutrientes, proporcionando un enfoque sostenible para minimizar el estrés hídrico y biótico de los viñedos [69].

Las tendencias futuras se centran en mejorar la mecanización para obtener mayor eficiencia en el uso de agua, tener en cuenta la diversidad genética y, sobre todo, en cómo evaluar el estado hídrico de la vid y explorar las interacciones entre la disponibilidad de agua y otros factores de estrés [11,70,71].

Teniendo en cuenta la información proporcionada en este punto, existe un claro conocimiento de investigaciones previas sobre las necesidades hídricas del cultivo de la vid y las diferentes estrategias de riego, pero no se ha estudiado suficientemente como es el mejor sistema para aplicar las necesidades de agua que tiene el cultivo, que permita maximizar la producción y la calidad del cultivo. En este sentido el estudio de las diferentes estrategias en relación a las frecuencias de riego, es decir, como y cuando aplicar el agua al cultivo, puede afectar de una forma muy importante a la calidad, la productividad y el estado hídrico del cultivo.

1.4. Influencia de la frecuencia de riego a la eficiencia del uso del agua.

La frecuencia de riego es un factor importante a considerar en la programación del riego. Debido a las diferencias en la humedad del suelo y al patrón de humedad, los rendimientos de los cultivos pueden ser diferentes cuando se aplica la misma cantidad de agua con diferentes frecuencias de riego [72]. En la mayoría de las ocasiones, cuando mayor es la cantidad de agua aplicada y menor es la frecuencia de riego, la distribución del agua horizontalmente es mayor y viceversa. En general, las partículas más finas de suelos arcillosos retienen el agua más superficialmente, distribuyéndose el agua en una tendencia horizontal y las partículas más gruesas de suelo más arenosos, tienen más espacios entre ellas y la tendencia del agua es vertical [73].

La frecuencia de riego utilizada por los viticultores y por lo tanto la cantidad de riego aplicada en cada evento, puede depender de múltiples factores entre los que se encuentran la variedad de cultivo y las estrategias agronómicas según el tipo de suelo o clima [74]. En concreto, en España, una investigación analiza diferentes frecuencias utilizadas en 4 regiones

diferentes, se encuentran riegos diarios, dos riegos por semana, un riego por semana y un riego cada quince días. De manera más específica, en Badajoz y variedad tempranillo, se llevan a cabo dos riegos por semana, uno cada semana y uno cada quince días. En Valladolid con variedad Tempranillo, dos riegos por semana, uno cada semana y uno cada quince días. En Albacete con variedad Syrah, uno y dos riegos por semana y en Lugo variedad Mencía un riego diario, dos riegos por semana y uno por semana [75].

Estas diferencias de cantidad de agua aplicada en cada evento de riego, puede afectar al patrón de humedecimiento de riego o fracción humedecida de riego (fw), por lo tanto, se considera importante estudiar si afecta esta frecuencia a la evaporación del agua del suelo, a la transpiración de cultivo, al rendimiento o alguno de los parámetros medibles. Sin embargo, el efecto de esta frecuencia, hasta donde se conoce, no ha sido lo suficientemente estudiado, debido a que puede afectar multitud de factores [75].

Algunos estudios han mostrado respuestas positivas de los cultivos bajo riego por goteo de alta frecuencia [76]. Sin embargo, otros estudios han demostrado que cuanto mayor es la cantidad de riego aplicado, mayor es la eficiencia y mejores resultados se obtienen en cuanto a transpiración de cultivo, cuando se reduce la frecuencia de riego [77,78], lo que genera dudas sobre el uso de riego de alta frecuencia en zonas semiáridas y hace plantearse como afecta la frecuencia de riego en viña.

En suelos arenosos en viña se ha informado que riegos más frecuentes aumentaron el rendimiento y el peso de la madera de poda [79]. Por el contrario, en un suelo franco arcilloso en viña se observó lo opuesto, la menor frecuencia de aplicación implicó un mejor estado hídrico de la planta que resultó en un mayor producción y peso de madera de poda [80]. En un suelo arcilloso pesado, la mayor frecuencia de riego (cada 2 días) conduce a una pérdida de eficiencia en condiciones de baja disponibilidad de agua [81]. En un estudio de 4 años, se comparó el efecto de frecuencias de riego de 1 y 3 días en un suelo franco arenoso en diferentes variedades, no se observó efecto sobre el peso de poda pero se encontraron mejores rendimientos para los tratamientos menos frecuentes [82]. Debido a la variabilidad de resultados y a la dependencia diferentes factores, es necesario seguir investigando en esta línea [81].

En un estudio diferente, un mayor estrés en las plantas se asoció con una mayor frecuencia de riego cuando se aplicó una cantidad particular de agua. Sin embargo, cuando se aplicaron cantidades mayores no se observaron diferencias entre las diferentes

frecuencias, lo que demuestra que la influencia de la frecuencia de riego también puede depender de la cantidad total de agua aplicada [81].

En un estudio realizado sobre diferentes variedades de vid y con diferentes frecuencias de riego, se analiza el efecto sobre la producción desarrollo vegetativo y otros parámetros medibles, se obtiene poco alcance y poca variación significativas entre frecuencias, obteniéndose resultados diferentes según la variedad de la vid y el año de cultivo, concluyendo que no se pueden sacar patrones y que la variedad, año y ubicación de cultivo junto a parámetros de suelo, cultivo y clima hacen difícil evaluar el efecto de la frecuencia, animando a investigar más sobre este tema [75].

En otros cultivos, también se han encontrado variabilidad en cuanto a la mejor frecuencia. Por ejemplo, en cebolla en un suelo franco arenoso, se comparó una frecuencia de riego cada 5, 10, 15 y 20 días, resultando el mejor intervalo cada 5 días. En maíz, un suelo franco arenoso, se comparó riego cada 3, 6, 8, 12 y 15 días siendo el mejor cada 6 días. En pimienta, un suelo franco arcilloso arenoso se comparó un riego cada 1, 3, 4 y 5 días siendo el mejor, el riego diario. En col, en un suelo franco arenoso, se comparó un riego cada 2,4 y 8 días siendo el mejor riego cada 4 días. En lechuga, se comparó un riego cada 2 y 4 días en un suelo franco arcilloso arenoso, siendo el mejor riego cada 2 días [83].

Dada esta variabilidad, utilizando una técnica confiable y mediciones de campo, es importante estudiar el efecto de la frecuencia de riego en una zona semiárida en la que la vid es un cultivo de gran importancia.

1.5. Fracción de la superficie del suelo humedecida por cada riego.

Una de las variantes que puede verse afectada por las diferencias en la frecuencia de riego es la fracción humedecida del suelo (f_w). El agua cuando se introduce en el suelo se establece entre los poros de las partículas del suelo, desplazándose a través de este según sea el tamaño las partículas, es decir, según el tipo de textura de suelo. En estudios previos se ha demostrado que suelos más arcillosos o con tamaños de partículas más pequeñas, se obtienen f_w mayores que en suelos con partículas de suelo más grandes o arenosos [73].

La f_w es la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia, tiene un valor entre 0 y 1, donde 1 significa que la superficie del suelo está completamente húmeda, como por ejemplo cuando llueve, y 0 significa que la superficie de suelo está completamente seca, si no llueve, no se riega y la superficie de suelo se ha secado. Los valores entre 0 y 1 de la f_w pueden variar según la cantidad aplicada de riego, así como los condicionantes

edafoclimáticos. Los valores comunes de fw para precipitación o para los diferentes tipos de riego existente, suelen ser los siguientes [22]:

- Precipitación: 1.
- Riego por aspersión: 1.
- Riego por pozas: 1.
- Riego por melgas: 1.
- Riegos por surcos (cada surco), camas estrechas: entre 0,6 y 1.
- Riegos por surcos (cada surco), camas anchas: entre 0,4 y 0,6.
- Riego por surcos (surcos alternados): entre 0,3 y 0,5.
- Riego por goteo: entre 0,3 y 0,4.

El riego más utilizado en el cultivo del viñedo es el riego por goteo, sobre todo en localizaciones con limitaciones de agua, un riego que permite realizar un uso eficiente aplicando de manera más exacta las necesidades [84,85]. Según lo comentado anteriormente se debería elegir para riego por goteo entre 0,3 y 0,4 [22], sin embargo, este valor puede variar según diferentes factores como puede ser la cantidad de agua aplicada en cada evento de riego o el tipo de suelo, por lo tanto, es fundamental analizar la fw real en campo.

El análisis de la fw producida por el riego es muy importante porque puede afectar a la evaporación y transpiración de cultivo y, por lo tanto, al uso eficiente del agua. Factores como la radiación solar directa, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento influyen en la evaporación del agua del suelo. La profundidad de la capa de suelo que está sujeta a secado por evaporación está entre 0,1 y 0,15 m. Si la fw es alta, puede provocar que haya más superficie de suelo expuesta a la evaporación y esto debe evaluarse si afecta a que haya mayor o menor pérdida por evaporación. Además, el contenido de agua del suelo y su capacidad para conducir el agua a las raíces pueden determinar la tasa de transpiración del cultivo [22].

En la Figura 10, se puede ver de una manera visual la fw producida por un riego en un viñedo, como se observa el valor debe estar comprendido entre 0 y 1, pero se debe conocer el valor exacto.



Figura 10. Vista de fracción humedecida por riego de la superficie del suelo en viñedo (fuente: elaboración propia).

Cuando la frecuencia de riego es baja, es necesario aplicar más agua en cada evento de riego para mantener la cantidad total de agua aplicada y, por lo tanto, si hay diferentes cantidades aplicadas en cada evento, debe haber variaciones en la fw [73].

Esta fw puede introducirse en modelos de simulación como SIMDualKc, este es un modelo que permite obtener la ETc de manera dual, es decir, observando que cantidad que se pierde por evaporación del suelo y que cantidad se pierde por transpiración de cultivo [86,87]. La eficacia de SIMDualKc ha sido demostrada y es recomendado para el cálculo de esta evapotranspiración de cultivo de manera dual [88].

En este modelo, si selecciona riego por goteo, un fw de 0,4 se establece automáticamente, independientemente de la frecuencia o cantidad aplicada, ya que es el valor predeterminado en la puesta en marcha del modelo [86,87]. Pero el modelo también es útil porque permite modificar estos valores manualmente con observaciones de campo, por lo tanto, si se varía el tipo, cantidad y frecuencia de riego, esta fw también se debe variar, y esto puede afectar la evaporación y transpiración del cultivo, lo cual podemos observarlo con el modelo SIMDualKc. En consecuencia, se considera importante estudiar el valor exacto de fw de cada zona en función de las características edafoclimáticas. SIMDualKc, se basa en la metodología ETc dual de FAO-56 y, por lo tanto, puede servir como un medio conveniente y efectivo para comparar una implementación estandarizada con otras estrategias de aplicación de FAO-56, para ello se deben introducir datos reales de campo obligatorios y datos voluntarios, en la Figura 11 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del modelo SIMDualKc [86].

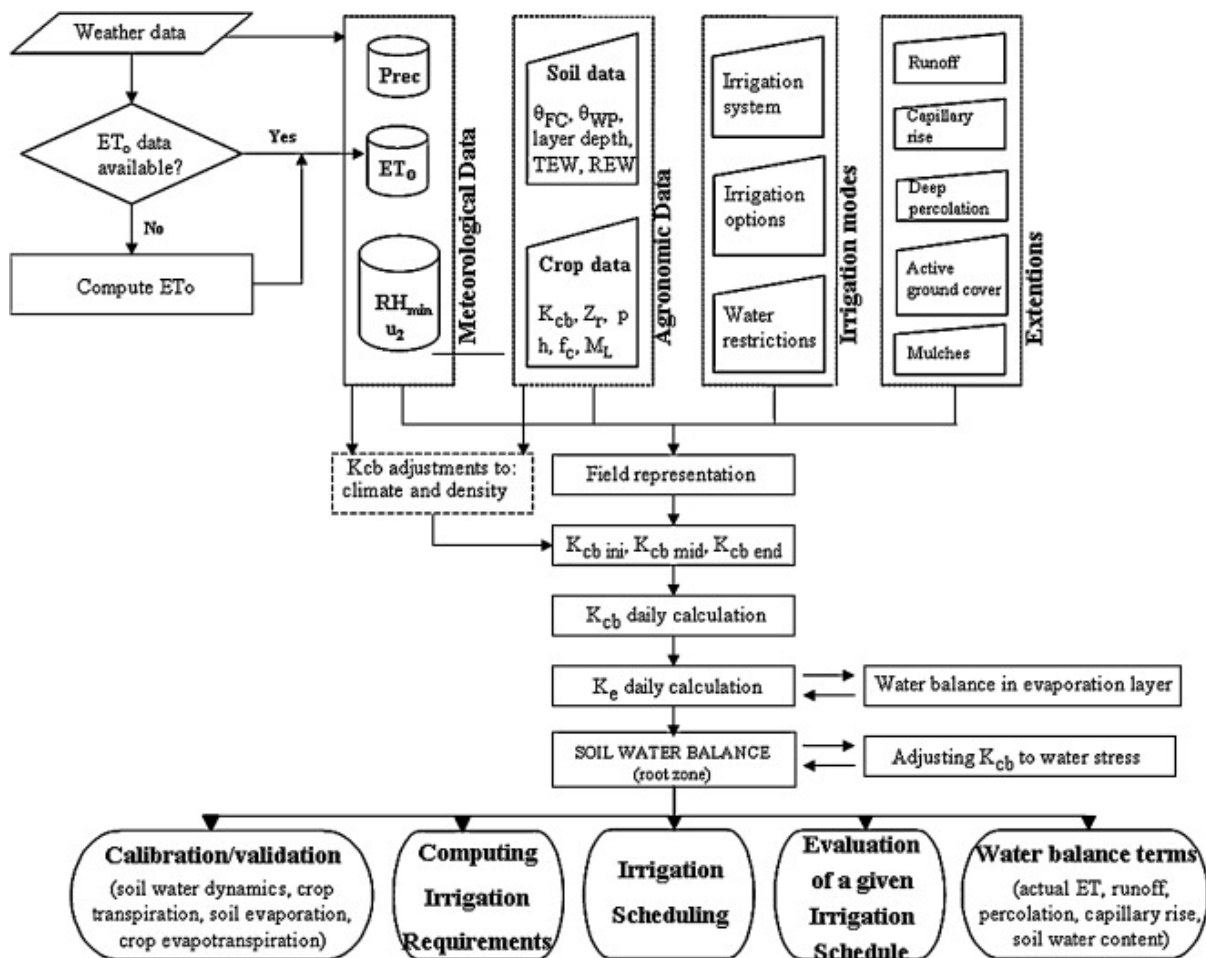


Figura 11. Diagrama de flujo de modelo de simulación SIMDualKc (Fuente: [89]).

Como se observa en la Figura 11, el primer paso es introducir los datos de clima (precipitación, ETo, humedad relativa mínima (RHmin) y velocidad media del viento (u_2), si la ETo no es introducida el modelo puede calcularla con los datos meteorológicos introducidos. Además, de esto, se introducen los datos de agronómicos, datos de suelo (θ_{FC} = capacidad de campo, θ_{WP} = punto de marchitez, TEW= Agua Evaporable Total, REW= Agua Fácilmente Evaporable, capas del terreno en cuanto a profundidad y tipo de suelo), datos de cultivo (K_{cb} , Z_r = profundidad efectiva de la zona radicular, p = es la fracción de agotamiento al inicio del estrés, h = altura de cultivo, f_c = fracción de suelo cubierto o sombreado por vegetación, M_L = multiplicador de f_c para máxima ETC). También se introduce de manera obligatoria los datos de riego, seleccionado el sistema de riego (aquí es donde se puede modificar la f_w que viene establecida por defecto), las opciones de riego y si se desean restricciones de agua. Por último, se pueden introducir datos de manera opcional o si se han utilizado, de escorrentía superficial, de la cubierta vegetal activa, de coberturas, de aguas subterráneas, de cultivos intercalados o de salinidad. Todos estos datos hacen una representación del campo medida. Con los datos meteorológicos y agronómicos (suelo y cultivo) se realiza un ajuste de la K_{cb} al clima y a la densidad de cultivo, para establecerse una K_{cb} de periodo inicial, medio y final.

Una vez esto establecido se produce el cálculo de la K_{cb} diaria. Además, con los datos representados de todos los datos de campo se calcula la K_e diaria haciendo un balance de agua en la capa evaporable. Por último, SIMDualKc permite hacer el balance de agua en la zona de las raíces. Este modelo permite calibrar/validar dinámicas de agua de suelo, transpiraciones de cultivo, evapotranspiraciones, calcular requerimientos de riego, establecer programaciones de riego, evaluar programaciones de riego introducidas o analizar cualquier término del balance de agua de manera diaria o por campaña [86,87].

Para introducir esta f_w medida en campo en el modelo, se debe medir la humedad de suelo, para esto existen diferentes metodologías [90]:

Métodos directos:

-Método gravimétrico: económico, alta exactitud, escala espacial limitada, tiempo de respuesta 24 horas, mide contenido de agua en masa.

-Sonda de neutrones: caro, alta exactitud, escala espacial limitada, tiempo de respuesta 1 o 2 minutos, mide contenido de humedad volumétrico del suelo.

-Reflectometría en el dominio del tiempo o Time Domain Reflectometry (TDR): económico, alta exactitud, escala espacial limitada y tiempo de respuesta instantáneo, mide contenido de humedad volumétrico del suelo.

-Capacitancia y FDR: caro, baja exactitud, escala espacial limitada, tiempo de respuesta instantáneo, mide el contenido de humedad volumétrico del suelo.

-Tensiómetro: económico, alta exactitud, escala espacial limitada, tiempo de respuesta 2-3 horas, mide el potencial hídrico del suelo.

Métodos indirectos:

-Atenuación de rayos gamma: caro, baja exactitud, escala espacial limitada, tiempo de respuesta instantáneo, mide el contenido de humedad volumétrico.

-Teledetección: precio según superficie, baja exactitud, escala espacial grande, tiempo de respuesta instantáneo, mide humedad superficial del suelo.

-Método del sensor de capacitancia: caro, alta exactitud, escala espacial limitada, tiempo de respuesta instantáneo, mide el contenido de humedad volumétrico del suelo.

-Método de bloques de yeso: económico, baja exactitud, escala espacial limitada, tiempo de respuesta 2-3 horas, mide la tensión de humedad del suelo.

-Método de placa de presión: caro, baja exactitud, escala espacial limitada, tiempo de respuesta depende del suelo y mide el potencial hídrico del suelo.

-Radar de penetración terrestre: caro, alta exactitud, escala espacial grande, tiempo de respuesta instantáneo y mide el contenido de humedad volumétrico.

Teniendo en cuenta esto, la medida más destacada para tomar medidas de humedad de suelo de manera rápida, económica y sin ser destructiva en vid en un campo de ensayo, es la técnica de TDR, la cual se puede aplicar con el sensor FieldScout TDR 350 (Figura 12), esta técnica se basa en emitir pulsos electromagnéticos a través del suelo y medir el tiempo que tarda en regresar esos puntos electromagnéticos y ser detectados de nuevo por el sensor. Este tiempo de vuelta de los pulsos electromagnéticos están relacionados con la constante dieléctrica del suelo, la cual permite obtener el contenido de humedad. La constante dieléctrica es una medida de la capacidad de un material para almacenar energía eléctrica en un campo eléctrico, en el contexto de TDR, el aire tiene una constante dieléctrica muy baja, el suelo seco tiene una constante dieléctrica moderada y el agua tiene una constante dieléctrica muy alta. Cuando el pulso electromagnético viaja a través del suelo, el tiempo de vuelta del pulso es influenciado principalmente por la cantidad de agua presente, ya que el agua afecta significativamente a la constante dieléctrica del suelo, permitiendo conocer la humedad real medida. Esta técnica ha demostrado ser válida para medir el estado del agua en medios porosos como el suelo [91,92].



Figura 12. Sensor FieldScout Time Domain Reflectometry (TDR) 350 (Spectrum Technologies, Inc., Aurora, IL, USA) (fuente: elaboración propia).

Esto nos permite obtener un valor más realista de la evaporación y transpiración obtenida de las diferentes frecuencias de riego. Hasta donde se conoce, este tipo de ajuste no se ha realizado ni estudiado en la literatura con anterioridad. Además, se considera importante comparar estos resultados con mediciones de campo que indican el desarrollo y rendimiento del cultivo.

1.6. Tecnologías utilizadas para evaluar la eficiencia hídrica en viñedo.

Actualmente, existen diferentes técnicas para evaluar el estado hídrico del cultivo. Es posible utilizar técnicas que han mostrado su eficacia para medir el estado hídrico de la planta como sensores que miden variaciones del diámetro de tronco, de turgencia de hoja, de potencial hídrico de hoja y tallo, de conductancia estomática foliar, de actividad fotosintética, de flujo de savia, de temperatura infrarroja de cubierta y de radiación fotosintéticamente activa [11,93–95].

En cuanto a estas técnicas que han sido utilizadas para evaluar el estado hídrico en viñedo, el potencial hídrico es el principal indicador del estado hídrico de la vid de manera convencional, algunos autores han establecido relaciones entre este indicador y rasgos compositivos de la baya, sin embargo, estas relaciones difieren entre cultivares, regiones, años, tipos de suelo y prácticas de manejo [14,58,96].

Este potencial hídrico permite obtener un valor numérico con el cual comparar medidas puntuales realizadas anteriormente. Aunque es recomendable, realizar observaciones de cultivo en campo. En la Tabla 3, se muestran valores orientativos de potencial hídrico de hoja medidos a medio día. El potencial hídrico se expresa en unidades de presión (bares), aunque en bibliografía también puede encontrarse en megapascales (Mpa), siendo 10 bares igual a 1 MPa [20].

Tabla 3. Valores de potencial hídrico de hoja a medio día (bares) recomendaciones orientativas de viñedo de finca La Orden Cicytex (Fuente: [20]).

Potencial hídrico de hoja a medio día (bares)	Nivel de Estrés
Menos de -10 bares	Ausencia de estrés
De -10 a -12 bares	Estrés medio
De -12 a -14 bares	Estrés moderado
De -14 a -16 bares	Estrés fuerte
Más de -16 bares	Estrés severo

Como se puede observar en la Tabla 3, estos valores puntuales pueden servir para evaluar si la planta se encuentra estresada y a qué nivel de estrés. Teniendo en cuenta estos valores, y según las estrategias de riego comentadas anteriormente, se muestran en la Tabla

4, valores de potencial para poder utilizar esta técnica para controlar el estado hídrico de cultivo [20]:

Tabla 4. Valores de potencial hídrico de tallo a medio día (bares) recomendados para utilizar técnica de potencial hídrico para control de objetivo agronómico perseguido en viña (Fuente: [20]).

Objetivo	Inicio de riego	Preenvero	Postenvero
Sin limitaciones hídricas	-6 bares	-6 bares	-6 bares
Maximizar producción	-8 bares	De -9 a -11 bares	-12 bares
Maximizar calidad	-12 bares	De -13 a -15 bares	De -10 a -12 bares

Como se puede observar en la Tabla 4, el potencial hídrico es un indicador sencillo de utilizar y puede darnos valores o intervalos para ajustar el riego según las necesidades u objetivos buscados, no obstante, conviene tener en cuenta, que estos valores son orientativos y pueden depender de las características de cada viñedo [20].

En cuanto al potencial hídrico, puede ser potencial hídrico de tallo o foliar. Se demostró que las mediciones del potencial hídrico foliar en viñedos deberían ser reemplazadas como regla general por lecturas del potencial hídrico del tallo o antes del amanecer, ya que el potencial foliar es mucho menos discriminatorio que los otros dos, y sólo las restricciones operativas restringen su implementación y podría justificar su uso, además existe una cierta preferencia por el potencial hídrico del tallo a media mañana [97].

Se han realizado estudios del estado hídrico con potencial hídrico del tallo a mediodía a diferentes cantidades de riego, mostrando un potencial hídrico del tallo menos estresado cuando las vides fueron regadas con una cantidad mayor ($0,50xET_0$) en comparación con otros que fueron regados con menor cantidad ($0,25xET_0$) [64]. También se han realizado estudios de potencial hídrico de tallo en diferentes fechas y horas sin obtener diferencias significativas en los potenciales hídricos medidos a las 6:00 h, pero sí al mediodía solar (12:00 h), obteniendo potenciales hídricos menos estresados con riegos de $0,20xET_0$ en comparación de secano y potenciales hídricos menos estresados con $0,40xET_0$ en comparación con a $0,20xET_0$ [98]. También, el potencial hídrico mostró en un estudio tendencias que indican que una mayor frecuencia de riego implica una pérdida de eficiencia en condiciones de baja disponibilidad de agua [81], fomentando más investigaciones sobre este tema.

Además de las mediciones de potencial hídrico, una de las más utilizadas también es la conductancia estomática, la cual, ha sido demostrado que se puede utilizar para evaluar el

comportamiento estomático que está relacionado con la disponibilidad de agua en el cultivo y puede servir para comparar valores de otras medidas [99].

Sin embargo, aunque estas técnicas son útiles para obtener información de determinadas zonas de cultivo, estos valores son puntuales y pueden generar problemas a la hora de gestionar un riego debido a la representatividad de los resultados teniendo en cuenta la variabilidad espacial de una parcela. La variabilidad del suelo en el espacio y el tiempo y las interacciones suelo-clima afectan al rendimiento del viñedo a gran escala [100–102]. Dentro de una plantación se ha demostrado que estado hídrico de la vid es variable según la topografía, tipo de suelo, las prácticas de manejo y las propiedades del suelo, lo que puede llevar a variabilidad dentro del propio viñedo en el rendimiento, cantidad de azúcar o compuestos fenólicos [103].

Para solucionar problemas de variabilidad es posible utilizar tecnologías que puedan recoger información de una gran superficie, de manera sencilla, mediante sensores proximales o teledetección. Se consideran sensores proximales aquellos que obtienen medidas a menos de dos metros [104], si se encuentran a más de dos metros, en este contexto, podrían considerarse teledetección.

Dentro de estas tecnologías para tomar muestras de grandes superficies se encuentran: la detección por satélite, el uso de sistemas satelitales en teledetección representa una excelente herramienta de monitoreo que asegura un amplio uso en múltiples ocasiones. Sin embargo, debido a la resolución espacial o temporal, a veces no es suficiente para realizar una diferenciación detallada de las características del viñedo, al ser un sistema de cultivo en hilera, presenta la dificultad de separar fácilmente las hileras del suelo y otros elementos [105]. También se encuentra técnicas como la utilización de aeronaves, tienen una mejor resolución, pero son costosas y puede tener la limitación de vuelo en ciertas zonas. También, vehículos aéreos no tripulados o Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), los cuales tienen una gran resolución y son menos costosas de utilizar, pueden llevar a bordo cámara térmicas para obtener temperatura de dosel o índices derivados como Índice de Estrés Hídrico del Cultivo o Crop Water Stress Index (CWSI), cámara visible Red, Green, Blue (RGB) para generar imágenes visuales del campo para identificar posibles problemas, cámara multispectral que captura imágenes de bandas espectrales, incluyendo el infrarrojo cercano o near infrared (NIR) y el espectro visible, el cual puede ser útil para calcular índices como el Índice de Vegetación de Diferenciación Normalizada o Normalised Differentiation Vegetation Index (NDVI), cámara hiperespectral la cual tiene un rango más amplio de bandas espectrales y permite una caracterización muy detallada de las plantas y suelo, o Light Detection and

Ranging (LIDAR), que utiliza laser para medir distancias precisas y puede utilizarse para crear modelos tridimensionales de terreno y vegetación [11,106].

El uso de UAV ha sido recientemente estudiado como una herramienta valiosa para evaluar la heterogeneidad espacial-temporal y monitorear los viñedos con un coste operativo mínimo [107]. Se han estudiado las aplicaciones de imágenes térmicas con UAV en agricultura de precisión [108], demostrando el potencial de las mediciones térmicas de los UAV en diferentes aplicaciones, incluso como una forma rápida y práctica de evaluar y estimar el estado o estrés hídrico de los cultivos [109–111].

En términos de comparativas de diferentes técnicas, se han encontrado correlaciones positivas significativas de 0,81 entre las mediciones de temperatura tomadas desde UAV y desde tierra [112]. En cuanto a las mediciones de la cámara térmica y el potencial hídrico, se observaron coeficientes de correlación negativos significativos de $-0,72$ a $-0,80$ ($0,28 \times ETo$ a $0,36 \times ETo$) y $-0,73$ a $-0,86$ ($0,18 \times ETo$ a $0,24 \times ETo$) entre el potencial hídrico de la hoja entre las 14:00 y las 17:00 y una cámara térmica FLIR terrestre [113]. También se han encontrado correlaciones negativas significativas entre el potencial hídrico del tallo y las cámaras térmicas en vehículos aéreos no tripulados de $-0,71$ [112]. Si bien las variaciones en el déficit de presión de vapor pueden afectar a la temperatura del cultivo, la temperatura se considera un indicador útil [114]. Estos importantes valores de correlación sugieren que la temperatura del dosel medida en vehículos aéreos no tripulados puede ser un indicador simple y estandarizado para la recopilación rápida de datos en grandes áreas de terreno [115], obteniendo datos de superficie más representativas.

Algunos índices que pueden ser captados a partir de imágenes satelitales o mediante los UAVs comentados anteriormente también han sido estudiados. En cuanto al estrés hídrico, se ha descubierto que las imágenes térmicas muestran una correlación entre cambios menores en el estrés hídrico que son indetectables utilizando el NDVI, índice que se obtiene dividiendo la diferencia entre la suma de la reflectancia en el NIR y la reflectancia en el espectro visible Rojo (RED) [112]. Se ha encontrado que el CWSI calculado a partir de la temperatura del dosel se correlaciona con indicadores fisiológicos de la planta en ciertos casos [114–118]. El CWSI, es un índice que se basa en la relación entre la diferencia de temperatura de la hoja y la temperatura de aire, junto con el déficit de presión de vapor de agua de una planta sin estrés hídrico, se mide determinando la temperatura de dosel vegetal, temperatura del aire, humedad relativa, el límite inferior de la diferencia entre temperatura de cultivo y temperatura ambiente para una planta bien regada y el límite superior de temperatura de cultivo menos temperatura ambiente para una planta con estrés hídrico máximo [119,120].

Sin embargo, el uso a gran escala del CWSI como indicador para activar el riego no ha sido ampliamente adoptado durante una temporada completa por varias razones, entre las cuales se encuentra que la correlación entre el CWSI y el potencial hídrico puede diferir entre las etapas del cultivo y los cultivares [121]. Es bien sabido que incluso los déficits hídricos a corto plazo afectan los procesos de crecimiento e inducen el cierre de las estomas, lo que reduce la transpiración y, en consecuencia, el enfriamiento evaporativo, aumentando la temperatura de las hojas [122]. Esto hace interesante evaluar las técnicas existentes para determinar la influencia de las decisiones agronómicas sobre el estado hídrico del viñedo.

Además de estas tecnologías citadas para controlar el estado hídrico en viñedo, hay que destacar la posibilidad también de usar modelos para evaluar la eficiencia hídrica en viñedo. Entre los que se encuentran modelos como el citado anteriormente SIMDualKc que permite simular la evaporación y transpiración por separado utilizando datos de campo reales [86,87]. WaLIS un modelo para simular la partición de recursos hídricos y estimar la ET y el uso de agua para vid y para cobertura entre hileras [88], HYDRUS-2D modelo mecanicista que permite calcular flujos de agua del suelo y mejorar las prácticas agrícolas en viñedos [123]. CropSyst, un modelo que simula los balances de agua y nitrógeno del suelo, el crecimiento y desarrollo de los cultivos, el rendimiento de los cultivos, la producción y descomposición de residuos, la erosión del suelo por el agua y la salinidad [124,125]. Modelo de balance de energía de dos fuentes o thermal-based two-source energy balance (TSEB) basado en la temperatura para monitorear la ET diaria en viñas y en el espacio entre hileras [126,127]. También la utilización de plataforma de Internet de las cosas o Internet of Things (IoT) de biosensores para gestión de agua en viñedos [128]. Existen también sistemas automatizados de soporte de decisiones o decision support system (DSS), como IrriDesk®, una plataforma derivada de IRRIX, alojada en la nube desarrollada bajo el paradigma del gemelo digital, que diariamente envía prescripciones actualizadas, basadas en balance hídrico del suelo, a los controladores de riego, siguiendo la integración de diferentes fuentes de datos como sensores locales, datos meteorológicos y de teledetección, ha sido utilizada para cultivos como olivos, viñedos, ciruelos, manzanos [129–132]. Esta variabilidad de tecnologías es interesante tenerlas en cuenta para seleccionar aquella que pueda ayudar al objetivo que se busca con la información proporcionada por dicha tecnología.

En concreto, para evaluar una eficiencia en el riego, es importante hacer hincapié en la evaporación y transpiración por separado, para ver que parte del agua no ha podido ser aprovechada y ha sido evaporada directamente del suelo. La evaporación y la transpiración se han estudiado con SIMDualKc considerando diferentes estrategias agronómicas de riego y teniendo en cuenta factores como la cantidad de riego, la presencia de cobertura vegetal y

la altura del cultivo en el viñedo [88,133–136]. Además, SIMDualKc ha demostrado su gran eficacia en el cálculo de evaporación y transpiración por separado también en otros cultivos como maíz [137], trigo [138], girasol [139], arroz [140], soja [141], olivos [142], cítricos [143], almendros [144], alfalfa [145], calabacín [146], tomate [147], pimiento [148], patata [149], guisante [150], cebada [151], manzanos [152] y algodón [153]. Sin embargo, en los estudios realizados con SIMDualKc en viña, los balances hídricos se realizaron sin estudiar diferentes frecuencias de riego.

Algunas tecnologías empleadas en el análisis de la evaporación y la transpiración en viña incluyen el uso de covarianza de remolinos, microlisímetros y sensores de flujo de savia [154], el modelo WaLIS [155], imágenes de satélite e índices de vegetación [156], sensores de flujo de savia, minilísimetros, sondas de neutrones y un sensor de TDR [157]. Sin embargo, en estos estudios no se tuvo en cuenta el efecto de las diferencias entre las frecuencias de riego.

Los estudios que se han realizado sobre el impacto de la frecuencia de riego se han realizado en base a mediciones del flujo de savia [78], lisímetros de pesada [77], potencial hídrico, índice de área foliar (LAI) y rendimiento [81] o parámetros de calidad [75]. Si bien algunos estudios han evaluado la frecuencia de riego en viñedos, no han utilizado SIMDualKc para analizar el efecto sobre la evaporación y la transpiración por separado.

Teniendo en cuenta esto, no se conocen estudios en los que se haya analizado el efecto de la frecuencia de riego en viñedo sobre la evaporación y la transpiración con SIMDualKc, lo que supone una aportación novedosa del presente estudio. Además, se considera importante ajustar los requisitos del modelo desarrollado con mediciones de campo. También se muestra interés por investigar el efecto de diferentes estrategias agronómicas junto a la frecuencia de riego y cómo es posible detectarlas con tecnologías innovadoras como cámara térmica en UAV y compararlas con tradicionales como potencial hídrico.

Para ello el capítulo 4 se realiza un estudio sobre la utilización del modelo de simulación SIMDualKc para cálculo de evaporación y transpiración por separado, realizando una corrección de la fracción húmeda observada en campo, comprobando la viabilidad de un sensor TDR para evaluar el efecto de la frecuencia de riego en esta fracción humedecida y comparando los resultados con medidas de conductancia o rendimiento, y en el capítulo 5 se lleva a cabo un análisis de viabilidad técnica de monitoreo avanzado con cámara térmica en

un UAV o dron y con cámara de presión para evaluar el estado hídrico del viñedo según diferentes tratamientos agronómicos.

Capítulo 2. Objetivos.

El objetivo principal de esta tesis es analizar la viabilidad de distintas tecnologías para la evaluación del efecto de diferentes estrategias agronómicas, para llevar a cabo un riego inteligente, de tal forma que se permita conocer con precisión la eficiencia hídrica en un viñedo. Para ello, se contempla evaluar la información base proporcionada por un modelo de simulación con diferentes sensores que permiten tomar medidas de campo.

Este objetivo principal se desglosa en los siguientes objetivos parciales:

- Seleccionar y adaptar un modelo de simulación de cultivo para viñedo (capítulo 3).
- Poner en marcha diferentes tecnologías con sensores relacionadas con el uso hídrico en viñedo (capítulo 3).
- Ajustar el modelo de simulación con medidas de campo reales para cálculo de evapotranspiración dual, separando evaporación y transpiración y comparar estos resultados de diferentes estrategias agronómicas con datos de sensores de campo y analizar el efecto sobre el rendimiento (capítulo 4).
- Comprobar la viabilidad técnica de diferentes sensores, como cámara térmica en vehículo aéreo no tripulado y sensores de potencial hídrico, para monitorizar y analizar el efecto de diferentes estrategias agronómicas en la eficiencia hídrica del viñedo (capítulo 5).

Capítulo 3. Material y métodos.

3.1. Localización y ensayo experimental.

Los ensayos realizados en campo de la tesis doctoral se han desarrollado en la Finca La Orden perteneciente al Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX) en el suroeste de España (Guadajira, Badajoz). Concretamente, se han desarrollado en una parcela experimental de 1,2 hectáreas (ha) de viña tinta variedad Garnacha tinta (*Vitis vinífera L.*) injertado sobre un patrón o portainjerto 420A (Figura 13). El clima de esta localidad es semiárido.



Figura 13. Vista aérea parcela experimental viña tinta Finca La Orden-CICYTEX (fuente: [158]).

Las vides tienen 5 años y están conducidas en cordones bilaterales Royat en espaldera vertical. Todas las cepas se podan en invierno a ocho pulgares y dos yemas, 16 yemas por cepa. A principio de primavera, el número de pámpanos se ajusta manualmente a 16 por cepa. Las hileras están orientadas de norte a sur (N-S) y la distancia entre hileras y cepas es 3,0 y 1,4 metros (m) respectivamente.

En la parcela se llevó a cabo una caracterización de la variabilidad espacial de las características del suelo. Para ello, se midió con el sensor Dualem-1S equipado con un Sistema de Posicionamiento Global o Global Positioning System (GPS) para recabar información sobre la distribución espacial de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) en la parcela de ensayo. Este sensor permitió realizar un mapeo de toda la superficie del ensayo para determinar las diferentes zonas de la parcela para buscar la homogeneidad

a la hora de elegir las parcelas de cada sistema de riego. La CEa se realizó con un sensor Dualem-1S localizado a ras del suelo, realizando diferentes pases a lo largo de todo el ensayo a una distancia aproximadamente de 3 m. Se midió la CEa a 0-0.50m (CEa superficial) y 0-1.50 m (CEa profunda) (Figura 14). Los datos se trataron con el programa geoestadístico de Sistema de Información Geográfica Cuántico o Quantum Geographic System (QGIS) obteniendo el mapa de la CEa, mediante la técnica del Krigeado ordinario. Con los datos obtenidos se obtuvieron los datos medios para cada una de las parcelas elementales utilizando la herramienta de estadística zonal en QGIS. Los valores de CEa más bajos indican un suelo más ligero y los más altos zona más pesada. Se observa que existe una tendencia desde la esquina inferior de la parcela hasta la esquina superior derecha, tanto con valores tomados en la zona superficial como profunda.

La CEa es la habilidad que un material tiene de transmitir o conducir una corriente eléctrica [159]. La CEa del suelo se refiere a la capacidad que tiene el suelo de transmitir una corriente eléctrica siendo una propiedad distinta de la conductividad eléctrica (CEe) del extracto de saturación del suelo, que es un indicador de la concentración de sales disueltas en la solución del suelo [160]. La CEa del suelo está influenciada por propiedades del suelo tales como la capacidad de almacenamiento de agua [161], la salinidad [162], la capacidad de intercambio catiónico [163], el pH [164] y la materia orgánica [165]. La caracterización de la variabilidad espacial del suelo mediante la CEa con mediciones geoespaciales es un método fiable, rápido y fácil de tomar con equipos de medición móviles con GPS, además de ser una medida probada y sólida para caracterizar propiedades del suelo que influyen en la CEa [166]. Además, los estudios de CEa para caracterizar la variabilidad espacial del suelo son válidos para determinar ubicaciones de muestreos dirigidos que proporcionen información real para establecer la distribución espacial de aquellas propiedades del suelo correlacionadas con CEa dentro de un campo [166].

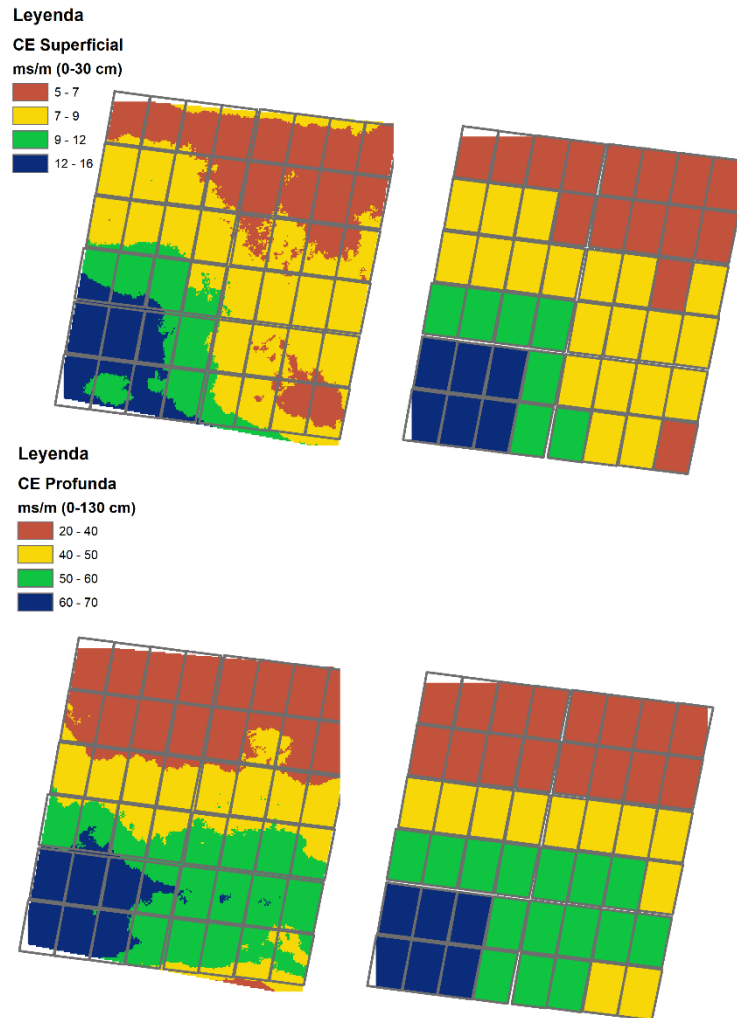


Figura 14. Conductividad Eléctrica aparente (CEa) a 0-0.50 m (superficial) y a 0-1.50 m (profunda) de la parcela experimental de viñedo de Finca La Orden Cicytex (fuente: elaboración propia).

A partir del mapa resultante permite estudiar el efecto de la localización de cada una de las repeticiones de cada uno de los tratamientos. Con este estudio se verifica la necesidad de establecer los bloques en función de la dirección de la variación de la textura de suelo en la parcela

Se utiliza un riego por goteo superficial, con una disposición de bandas elásticas elevadas sujetas por un alambre. Cada gotero está separado 0,7 m y tiene un caudal de 4 litros por hora (l/h). Se tiene, por lo tanto, dos goteros por cada cepa (Figura 15). La parcela está dividida en subparcelas o sectores con diferentes tratamientos de riego: T07, tratamiento control que consistió en aplicar 30% ETo desde el tamaño de un guisante con frecuencia de riego cada siete días. La ETo se calcula a partir de una estación meteorológica cercana (distancia menor a 1 km) a la parcela de prueba según el método Penman-Monteith. T03, volumen de riego igual que T07, pero frecuencia de riego cada tres días. T15, volumen de

riego igual que T07, pero la frecuencia de riego es quincenal. T7P, riego igual que T07 en volumen y frecuencia desde el tamaño de guisante, pero con un riego hasta la capacidad de campo antes de la brotación. T7A, riego igual que T07 en volumen y frecuencia a partir del tamaño de un guisante, pero con una posición de dosel abierta (sin brotes verticales). T7V, riego igual que T07 en volumen y frecuencia a partir del tamaño de guisante, pero el riego cesó en cosecha (25 de agosto). T00, tratamiento de secano. T0P, tratamiento de secano, pero con un riego hasta capacidad de campo antes de la brotación (Figura 16).



Figura 15. Cepas de Garnacha tinta con riego con goteo superficial elevado sujeto con alambre (fuente: elaboración propia).

Cada sector se encuentra repetido en 4 ocasiones en la parcela (bloque I, II, III y IV) (Figura 16) para tener en cuenta la variabilidad espacial de la parcela y poder obtener los datos necesarios para el procesamiento estadístico. Cada sector cuenta con 4 filas y 15 plantas por fila. Para el capítulo 4, media y desviación estándar junto a metodología ETc dual de FAO-56 de balance hídrico con entradas y salidas, implementada en el modelo de simulación SIMDualKc para el procesamiento de datos. Para el capítulo 5, con los valores medios obtenidos de las muestras analizadas se realiza un estudio estadístico utilizando el software IBM SPSS Statistics 23.0 para Windows 10 para el análisis de varianza de medidas repetidas en el tiempo (ANOVA RM), con un factor de tratamiento con ocho niveles en cuatro bloques cada tratamiento. Comprobando los supuestos previos, se analiza la significancia de las interacciones y cuando la significancia es significativa ($p < 0,05$), se realiza prueba post hoc de comparación de medias mediante el método Tukey. Se muestran resultados de media \pm desviación estándar. También se realiza un análisis de correlación de Pearson entre variables.

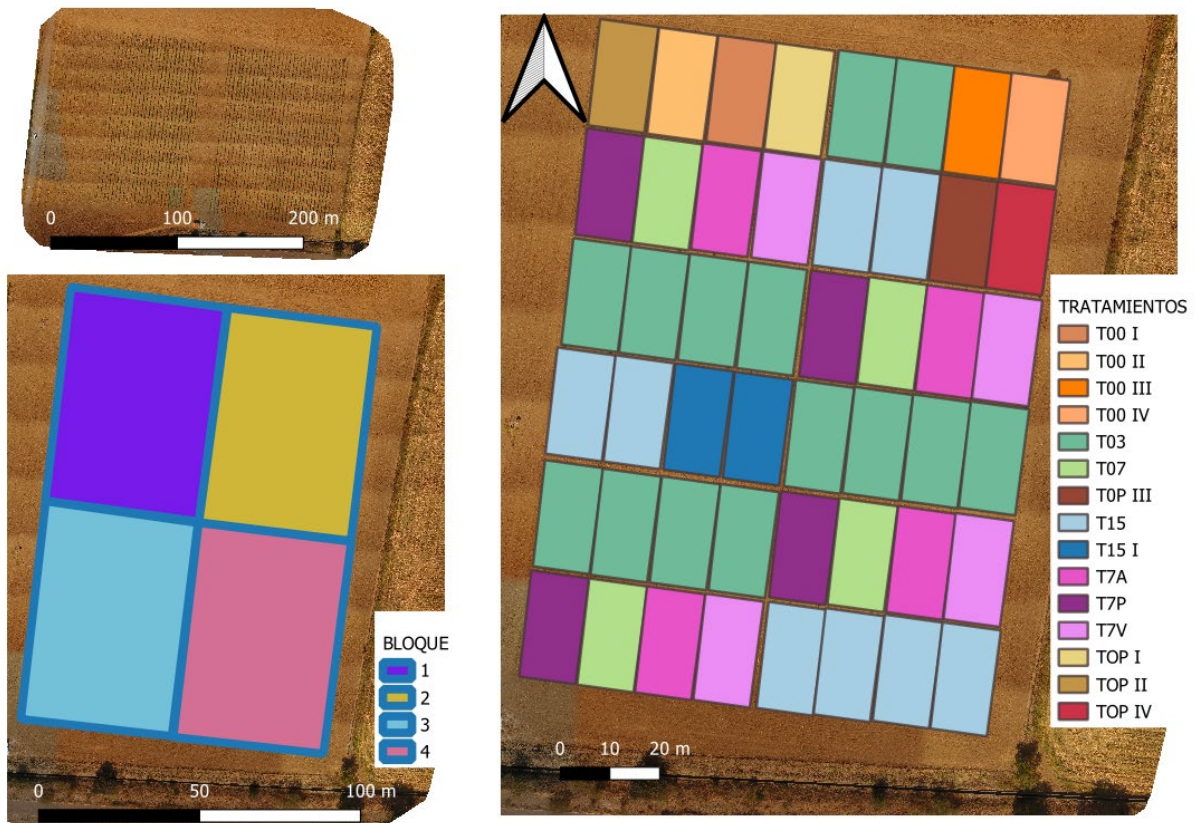


Figura 16. Distribución de bloques y tratamientos en la parcela de viñedo experimental de la Finca la Orden Cicytex (fuente: elaboración propia).

Junto a esta parcela experimental, se ha desarrollado en la Universidad de Extremadura, el análisis y procesamiento de datos, así como la redacción de artículos científicos correspondientes.

3.2. Medidas con sensor Time Domain Reflectometry (TDR) de fracción humedecida de suelo.

Para obtener los datos de la fw del suelo para cada tratamiento, se utilizó una plantilla de elaboración propia compuesta por un cartón forrado con plástico para evitar que se deteriore por la humedad del suelo tras los riegos. Para realizar esta plantilla se cogen cartones pegados con las dimensiones deseadas, se forra con plástico y posteriormente se hacen los correspondientes agujeros para realizar las diferentes medidas con el sensor (Figura 17).

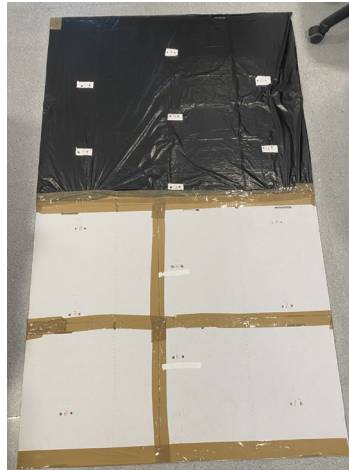


Figura 17. Plantilla de cartón forrada con plástico en proceso de elaboración para medidas de fracción húmeda de suelo con sensor TDR (fuente: elaboración propia).

Esta plantilla de cartón de 1,5 m de largo por 0,7 m de ancho cuenta con una superficie de medida de 1,05 m². La plantilla se colocó a ambos lados de un gotero, con el largo de la plantilla mirando hacia el centro de la calle entre hileras de cultivo. De esta manera, el porcentaje de fw de la mitad del marco de plantación (2,10 m²) se pudo extrapolar al marco total de siembra porque hay dos goteros entre dos plantas en la misma hilera.

Para medir la fw de cada tratamiento de riego, se midió la humedad con el sensor FieldScout TDR 350 (Spectrum Technologies, Inc., Aurora, IL, USA) sobre los agujeros de la plantilla. La plantilla contiene 33 agujeros, espaciados horizontalmente a una distancia de 0,35 m y verticalmente a una distancia de 0,15 m. Todas las distancias se refieren al centro del agujero (Figura 18).

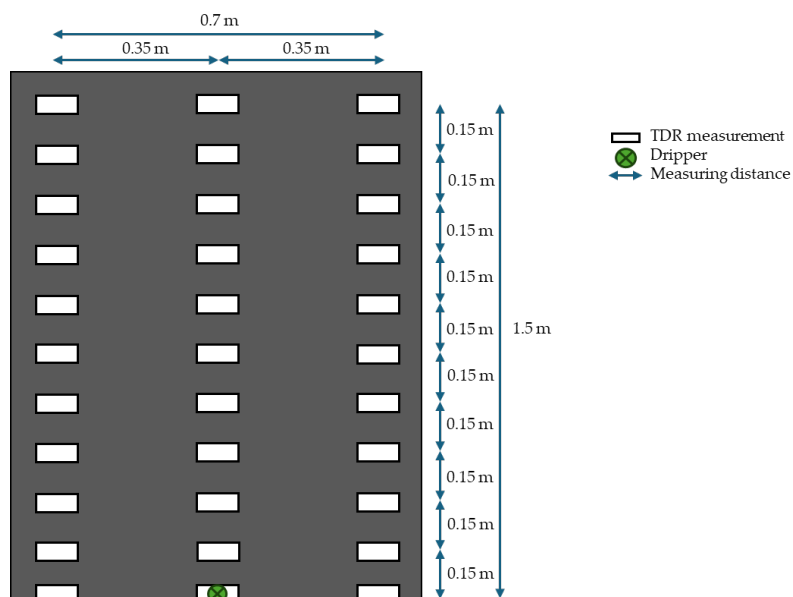


Figura 18. Dimensiones de plantilla (m) utilizada para medir fracción humedecida de suelo (fuente: elaboración propia).

Un sensor FieldScout TDR 350 fue utilizado para medir la fw del suelo por cada tratamiento de riego. El funcionamiento de este sensor se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos a través del suelo, midiendo el tiempo que tardan en regresar estos pulsos. Este tiempo es proporcional a la constante dieléctrica del medio aire-agua-suelo, que varía con la humedad. La profundidad de medición del suelo fue 4,8 pulgadas (0,12 m), ya que es la profundidad del suelo que es susceptible a secarse por evaporación [22]. De esta manera, pinchando el sensor en el suelo, podemos obtener la humedad de este punto (Figura 19).



Figura 19. Sensor FieldScout TDR 350 (Spectrum Technologies, Inc., Aurora, IL, USA) midiendo en campo la fracción humedecida (fw) del suelo por cada tratamiento de riego (fuente: elaboración propia).

Para determinar el valor de fw se considera que una zona está húmeda si su humedad es superior al 16,5%. Por ejemplo, si medimos en los 33 agujeros de un lado del gotero como del otro y los 66 agujeros tienen una humedad mayor al 16,5%, entonces el porcentaje de medida de la fw de ese tratamiento de riego es el 100% (o 1 en tanto por uno).

3.3. Modelo de simulación SIMDualKc.

El modelo SIMDualKc (Lisboa, Portugal) es la herramienta utilizada para calcular por separado la evaporación y la transpiración de cultivo [86,87]. El software puede descargarse de manera gratuita gracias al recurso localizado en la página web del Instituto Superior de Agronomía de la Universidad de Lisboa, en la sección de descargas [167]. En la pantalla general del modelo de simulación (Figura 20) podemos identificar como datos obligatorios datos de suelo, de clima, de cultivo y riego y como datos opcionales la escorrentía superficial, la cubierta vegetal activa, coberturas, aguas subterráneas, cultivos intercalados y salinidad. Finalmente hay una parte que permite combinar los datos para poner en marcha la simulación del modelo y para cerrar el programa. Se lleva a cabo el procesamiento de los datos obligatorios, no existiendo cubiertas ni cultivos entre hileras en el caso de la presente investigación.

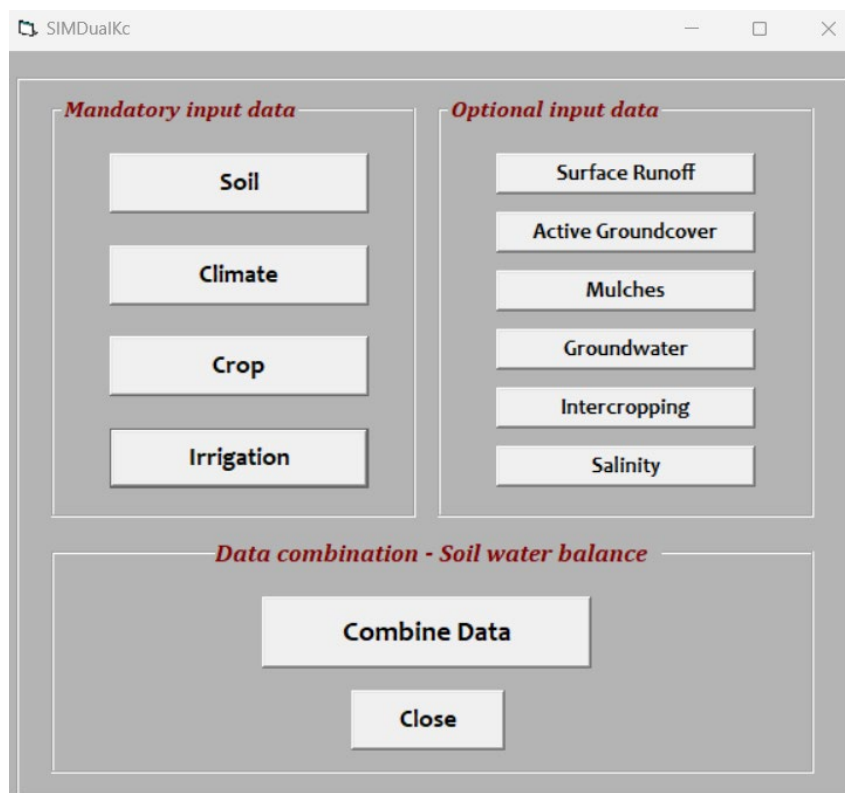


Figura 20. Interfaz inicial del modelo de simulación SIMDualKc (fuente: datos propios, software [86,87,167]).

3.3.1. Datos de suelo.

Para introducir los datos de suelo en el modelo de simulación para el cálculo del agua total disponible (TAW) se introducen los datos de TAW (mm/m) directamente, según los valores en función de la textura de suelo establecidos por FAO56 [22], los cuales se ofrecen en una tabla informativa dentro del modelo (TAW Table) (Figura 21). Se establecen los datos de TAW directamente según la textura de tres capas de suelo (0-0,30 m, 0,30-0,60 m y 0,60-0,90 m) analizadas tras la realización de una calicata.

Soil Name: Vinha_Orden

SOIL DATA | **EVAPORABLE LAYER DATA**

Select an option to compute TAW

- Insert Total available water (TAW) directly
- Compute through Fc and Wp (fractions in volume)
- Compute through FC and WP (fractions in weight)
- Compute through Pedo-transfer functions (PTF) Info

TAW Table
FC-WP Table
Bulk density Table
Soil textures % clay, sand, silt

Number of soil layers: 3

Soil layers	Top depth (m)	Bottom depth (m)	Layer tickness (m)	TAW (mm/m)
1st layer	0	0,3	0,3	80
2nd layer	0,3	0,6	0,3	90
3rd layer	0,6	0,9	0,3	100

SOIL'S DEPTH (m): 0,9 TAW (mm): 81

<< < > >> New Edit Save Delete Close

Figura 21. Interfaz de datos de suelo de modelo de simulación SIMDualKc para el cálculo del agua total disponible (TAW) (Fuente: datos propios, software [86,87,167]).

En cuanto a los datos del modelo de simulación de la capa evaporable para el cálculo del TEW y el REW, se establecen también directamente a partir los datos establecidos por FAO56 [22], según la textura de suelo de los 0,10 m, que es la capa de suelo sujeta al secado a través de la evaporación [22], identificando los valores correspondientes en las tablas informativas del modelo (TEW Table) y (REW Table) (Figura 22).

Figura 22. Interfaz de datos de capa evaporable de modelo de simulación SIMDualKc para el cálculo del agua evaporable total (TEW) y agua fácilmente evaporable (Fuente: datos propios, software [86,87,167]).

Una vez establecido los datos correspondientes, se guarda y cierra esta interfaz del modelo para que quede registrada en la base de datos del mismo. Pudiendo de esta manera pasar a la siguiente interfaz obligatoria.

3.3.2. Datos climáticos.

Para introducir los datos climáticos en el modelo se debe crear un documento Excel, generado tras seleccionar “Create Input Weather Data File” (Figura 23).

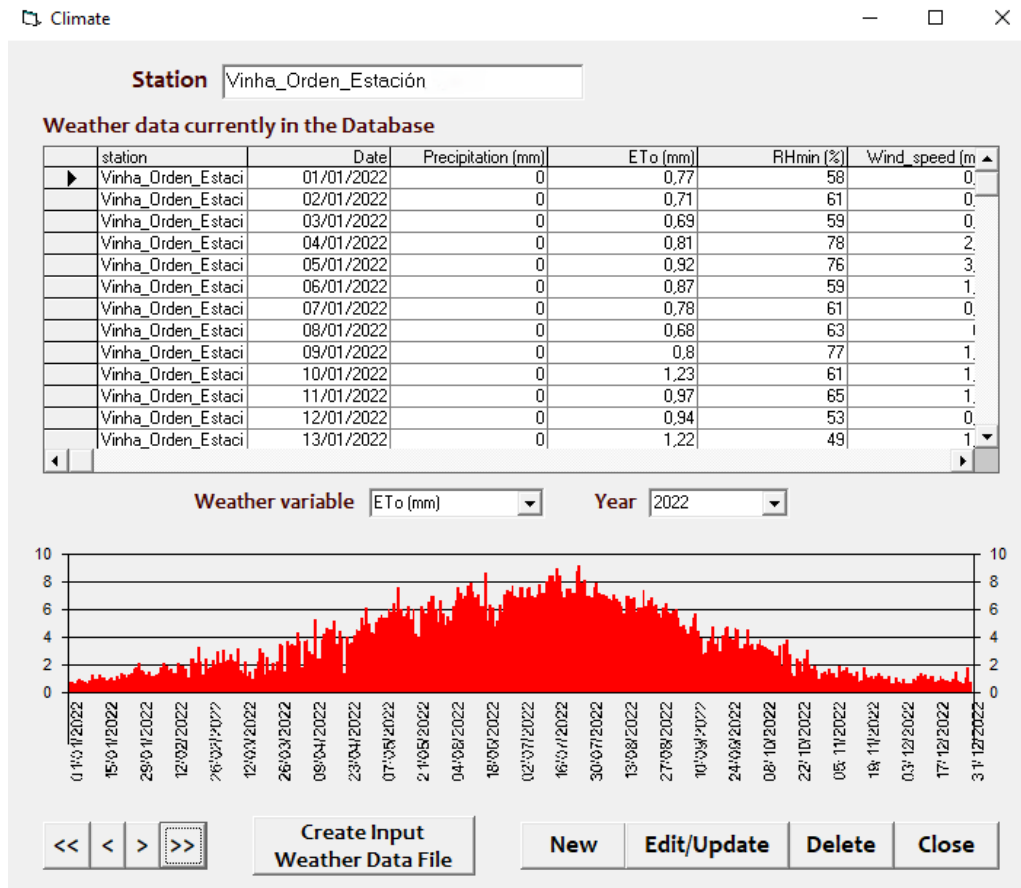


Figura 23. Interfaz inicial de datos de clima de modelo de simulación SIMDualKc (Fuente: datos propios, software [86,87,167]).

Posterior a esto, se selecciona la opción de introducir la precipitación (mm), evapotranspiración de referencia (ETo) (mm) y datos para ajustar el coeficiente basal (Kcb) de cultivo al clima introduciendo la humedad relativa mínima (%) y la velocidad del aire (m/s) (Figura 24). Estos datos que se introducen en el documento Excel, se obtienen directamente de una estación meteorológica situada a menos de 1 km de la parcela experimental.

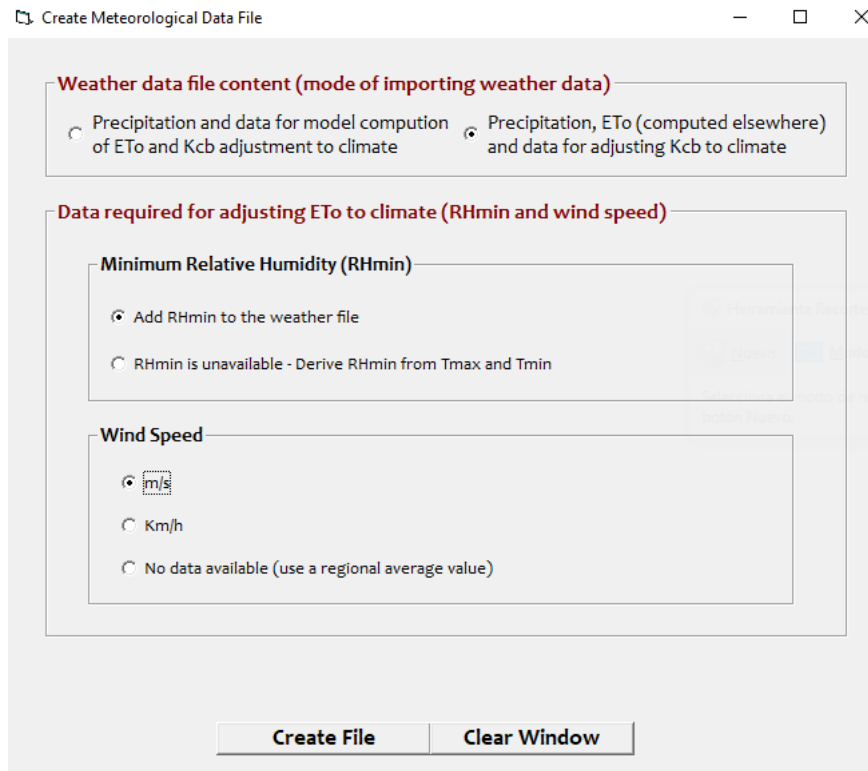


Figura 24. Interfaz para generación de Excel de introducción de datos climáticos del modelo SIMDualKc (fuente: datos propios, software [86,87,167]).

Una vez introducidos todos los datos en el fichero Excel, se guarda en formato “.txt” (texto delimitado por tabuladores). Se debe cerrar y volver a abrir para limpiar el archivo, lo cual se hace borrando cinco o más columnas de la derecha y filas de la parte inferior. Además, se debe comprobar que no hay columnas o filas con espacios en blanco.

Una vez creado este documento Excel con los datos climatológicos correspondientes, se crea una estación climatológica en la base de datos del modelo de simulación SIMDualKc, añadiendo los datos de latitud (grados, minutos y hemisferio), altitud (metros sobre el nivel del mar) y altura del anemómetro (m) (Figura 25).

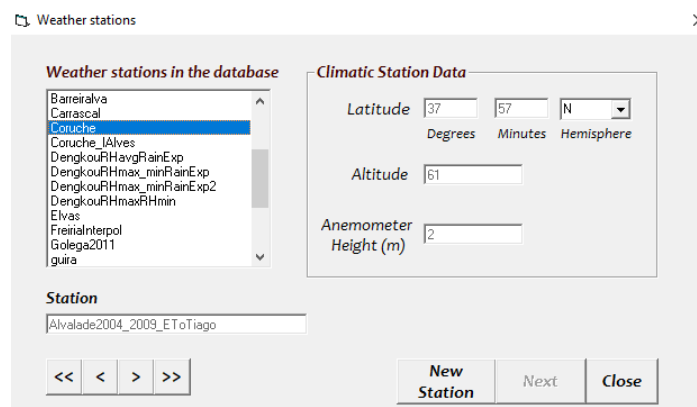


Figura 25. Interfaz de generación de estación climática en base de datos del modelo de simulación SIMDualKc (Fuente: datos propios, software [86,87,167]).

Por último, se importa el documento “.txt”, se valida y se guarda la base de datos climatológica en el modelo de simulación SIMDualKc.

3.3.3. Cultivo.

Para los datos de cultivo, en primer lugar, se selecciona el tipo de cultivo, en el caso de cultivo de viñedo se selecciona la opción de cultivo anual y árboles/arbustos de hoja caduca. A continuación, dentro de la ventana de desarrollo de cultivo, se introduce en el modelo de simulación SIMDualKc la fechas, la profundidad de las raíces, la altura de la planta y la p-fraction de las diferentes etapas diferenciadas: plantación/comienzo, comienzo crecimiento rápido, comienzo mitad de temporada, comienzo senescencia/madurez, final de temporada/cosecha (Figura 26). No se tiene en cuenta los periodos de no crecimiento. Las fechas o etapas son determinadas según FAO56 [22]. Se evalúan los citados parámetros mediante monitoreo semanal. La profundidad de raíz se mide con una excavación en el suelo y medida con un metro manual. La altura de cultivo se realiza con una mira telescópica de 5 metros. El valor de p-fraction es el establecido como referencia para cultivo de vid y sus variedades para producción de vino según FAO56 [22].

Crop Name
Vinha_Orden_Crop_

Type of crop
 Annual crops and deciduous trees/shrubs
 Evergreen trees and shrubs
 Forages with several cuts

Crop Development | Basal Crop Coefficients | Yield Response Factor

Crop Development

Growth Stages, Root Depth, Crop Height and p-fraction | Fraction of ground cover / LAI

Stages info | Root info | Height info | p info

Development Stages	Date	Root Depth (m)	Plant Height (m)	p-fraction
Planting/Initiation	15/03/2022	1,2	0,75	0,45
Start Rapid Growth	15/04/2022	1,2	0,75	0,45
Start Midseason	15/06/2022	1,2	2,2	0,45
Start Senescence/Maturity	25/07/2022	1,2	2,2	0,45
End Season/Harvesting	13/09/2022	1,2	2	0,45

Consider non-growing periods
 Non-growing is prior to planting/initiation
 Non-growing occurs after planting (e.g. frozen soil)

<< < > >> | New Crop | Edit Crop | Save | Delete | Close

Figura 26. Interfaz de entrada de etapas de crecimiento, profundidad de raíz, altura y p-fraction de cultivo del modelo de simulación SIMDualKc (fuente: datos propios, software: [86,87,167]).

Siguiendo dentro de la ventana de desarrollo de cultivo, se realiza un ajuste de la fracción de cobertura de la superficie del suelo por el cultivo (f_c) introduciendo el LAI, medido en diferentes fechas específicas (Figura 27). Este valor de LAI se mide cuatro veces durante la temporada de crecimiento con un analizador de cubierta vegetal LAI-2200 (LI-COR Inc, Lincoln, NE, EE.UU.) en dos plantas por parcela experimental (8 plantas por tratamiento).

The screenshot shows the 'Crop' software interface. At the top, there is a 'Crop Name' field with the text 'Vinha_Orden_Crop_'. Below it, the 'Type of crop' section has three radio buttons: 'Annual crops and deciduous trees/shrubs' (selected), 'Evergreen trees and shrubs', and 'Forages with several cuts'. There are three tabs: 'Crop Development', 'Basal Crop Coefficients', and 'Yield Response Factor'. The 'Crop Development' section is active and contains two sub-sections: 'Growth Stages, Root Depth, Crop Height and p-fraction' and 'Fraction of ground cover / LAI'. The 'Fraction of ground cover / LAI' section has two radio buttons: 'Input f_c ' and 'Input LAI'. Below these are several input fields for growth stages: 'Start "off" season', 'Planting', 'Start rapid growth', 'Start mid season', 'start senescence', and 'End season'. A table titled 'at specified dates' shows LAI values for specific dates. To the right of the table are two diagrams illustrating the impact of f_c on evaporation, with labels $1 - \epsilon$, f_c , and f_w . At the bottom, there are navigation buttons: '<<', '<', '>', '>>', 'New Crop', 'Edit Crop', 'Save', 'Delete', and 'Close'.

Date	LAI
15/03/2022	0
12/05/2022	1,079
01/06/2022	1,445
15/06/2022	1,819
06/08/2022	1,983

Figura 27. Interfaz de entrada de Índice de Área Foliar (LAI) de cultivo para ajuste de cobertura de suelo en modelo de simulación SIMDualKc (fuente: datos propios, software: [86,87,167]).

Dentro de la sección de cultivo, se introducen también los datos correspondientes a los coeficientes de cultivo basal (Kcb) (Figura 28). Para esto se introducen los valores de Kcb en condiciones de cobertura total y se ajusta a la densidad real de cultivo en el siguiente paso. Para eso, se introduce la altura máxima observada en el periodo inicial medio y final. También introduce el valor de función de sensibilidad estomática (Fr) establecido según intervalos de investigaciones previas [168] con ajuste relativo al control estomático con observaciones de campo de estrés hídricos medido con potencial hídrico con una cámara de presión tipo Scholander (Soil Moisture Corp., Model 3500, Santa Bárbara, CA, USA) (sección 3.4).

The screenshot shows the 'Basal Crop Coefficients - Kcb' input interface. It includes the following elements:

- Crop Name:** Vinha_Orden_Crop_
- Type of crop:** Annual crops and deciduous trees/shrubs (selected), Evergreen trees and shrubs, Forages with several cuts.
- Basal Crop Coefficients - Kcb:**
 - Input Mode:** Input Kcb / Kcb full at standard crop development stages (selected), Input Kcb at specified dates along the crop growth season.
 - Adjust specified Kcb to climatic conditions:** unchecked, with an 'info' button.
 - Kcb full at development stages:**

	Max Height	Fr	i	Kcb full
Off Season				0
Initial Period	0.75	0.65		0.69875
Mid Season	2.2	0.75		0.9
End Season	2	0.55		0.66
 - Graph:** A line graph showing Kcb values over time. The y-axis is labeled 'Kcb' and ranges from 0.2 to 1.2. The x-axis is labeled with 'Initial', 'Rapid growth', 'Mid season', and 'Late season'. The curve starts at approximately 0.7, rises to a peak of about 0.9 during the 'Rapid growth' phase, and then declines to about 0.66 at the end of the 'Late season'.

Navigation and action buttons at the bottom include: <<, <, >, >>, New Crop, Edit Crop, Save, Delete, and Close.

Figura 28. Interfaz de entrada de datos para coeficientes de cultivo basal (Kcb) y su ajuste en el modelo de simulación SIMDualKc (fuente: datos propios, software: [86,87,167]).

Para realizar el ajuste a la densidad real de cultivo se introduce en el modelo de simulación de nuevo el LAI medido en campo en las diferentes fechas y el coeficiente de cultivo mínimo establecido en FAO56 [22] (Figura 29). Por último, si se conocen datos de rendimiento se pueden establecer pérdidas relativas de rendimiento en la ventana de factor de respuesta de rendimiento.

Date	LAI
15/03/2022	0
12/05/2022	1,079
01/06/2022	1,445
15/06/2022	1,819
06/08/2022	1,983

Figura 29. Interfaz de entrada de LAI para ajuste de coeficiente basal de cultivo (Kcb) a la densidad real de cultivo (fuente: datos propios, software: [86,87,167]).

3.3.4. Riego.

En cuanto a los datos de riego, se introducen en la interfaz correspondiente a riego (Figura 30) de manera directa según los datos introducidos por el usuario. Para ello, se puede importar directamente datos introduciendo un archivo con los riegos establecidos en formato “.txt” o introducir directamente los datos en la interfaz del modelo de simulación.

Posteriormente se debe indicar el tipo de riego. Al seleccionar, por ejemplo, riego por goteo, como es el caso del presente investigación, se establece un valor de fracción humedecida por riego por defecto de 0,4 (40%) que es el valor que se observó en la puesta en marcha y calibración del modelo [86,87], sin embargo, se debe ajustar de manera manual por el usuario siempre que exista la posibilidad de medir esta fracción húmeda con sensores,

como en el caso de esta investigación, debido a que esta fracción húmeda va a variar según la cantidad de riego aplicada que va a depender de la frecuencia de riego establecida.

En la Figura 30, se muestra en la sección de “fraction of soil surface wetted by irrigation (fw)” como se introduce el dato observado en campo para un riego cada 3 días (T03).

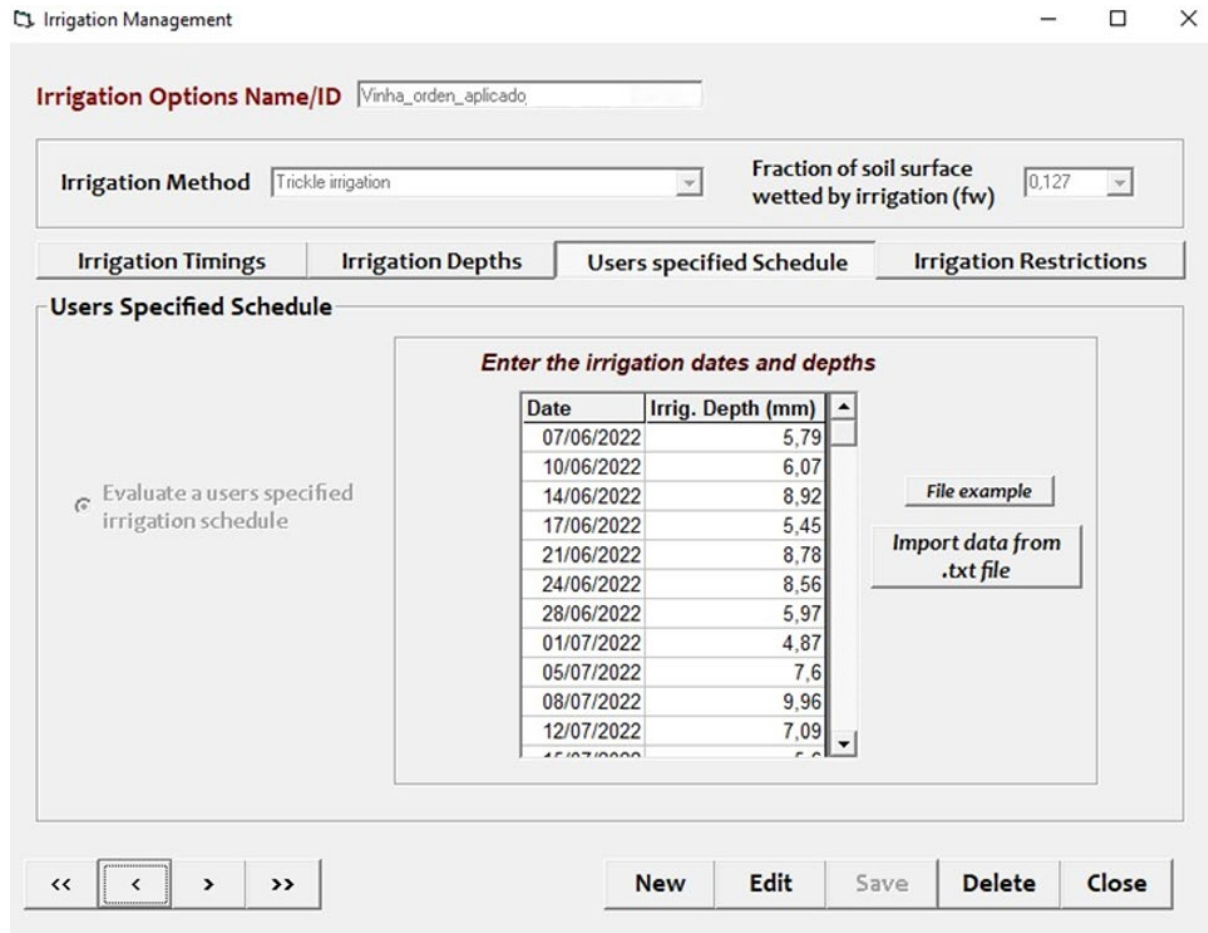


Figura 30. Interfaz de datos de riego específico del usuario para tratamiento T03 modelo de simulación SIMDualKc (fuente: datos propios, software: [86,87,167]).

En la Figura 31, se muestra en la misma sección de fw el dato observado en campo para un riego cada 7 días (T07).

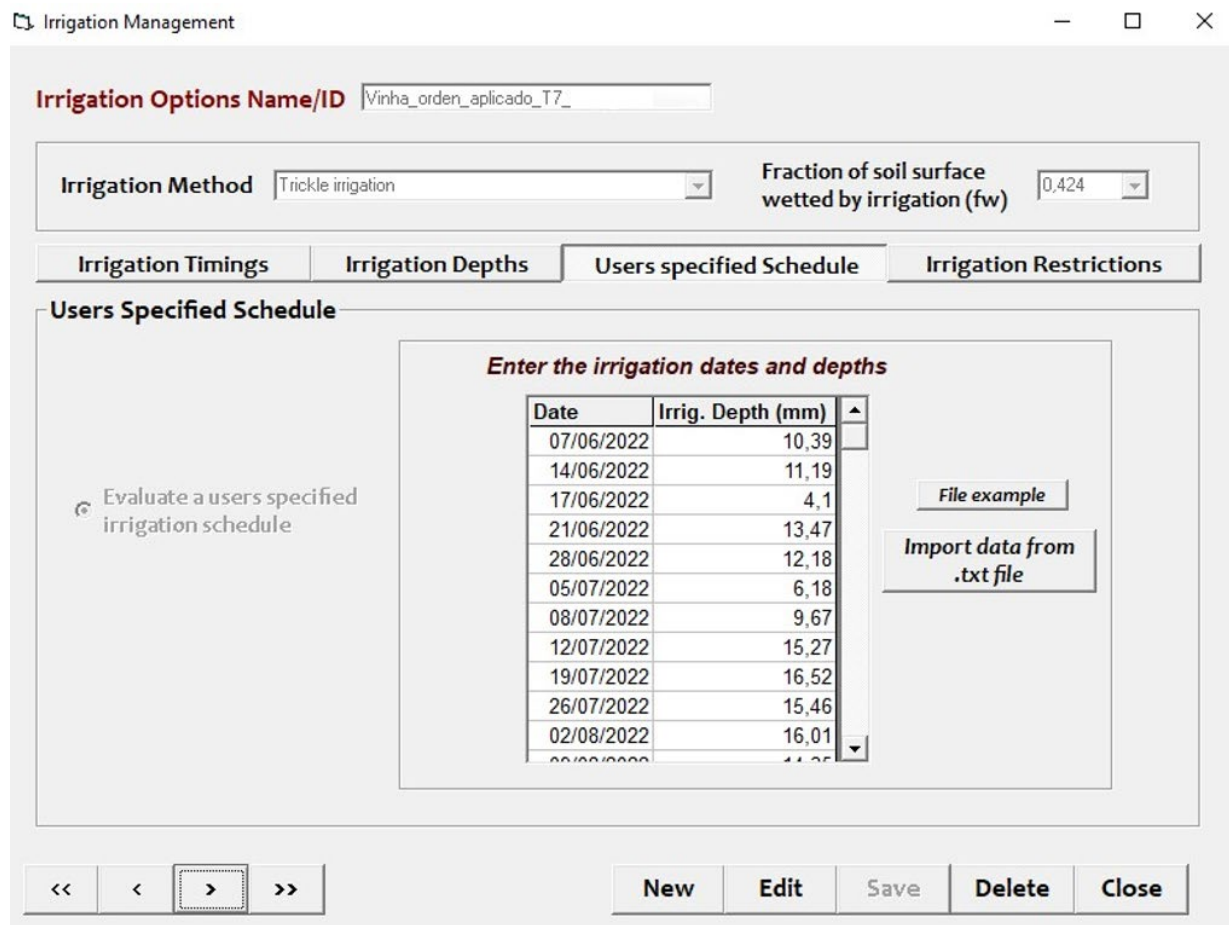


Figura 31. Interfaz de datos de riego específico del usuario para tratamiento T07 modelo de simulación SIMDualKc (fuente: datos propios, software: [86,87,167]).

Y en la Figura 32, se muestra en la misma sección de fw el dato observado en campo para un riego cada 15 días (T15).

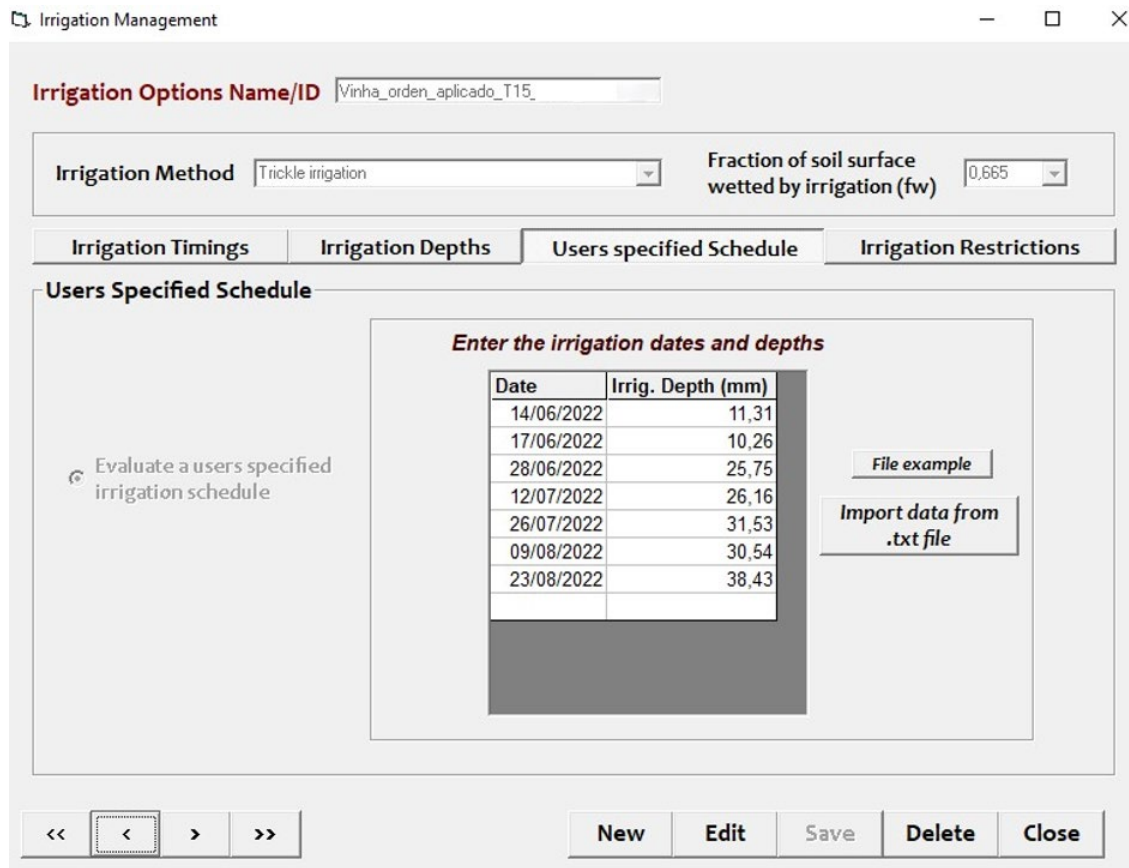


Figura 32. Interfaz de datos de riego específico del usuario para tratamiento T15 modelo de simulación SIMDualKc (fuente: datos propios, software: [86,87,167]).

Como se puede observar (Figura 30,31 y 32), de esta manera se puede establecer una fw para cada tratamiento de riego, debido a que este valor debe variar cuando varía la cantidad y frecuencia de riego.

3.3.5. Combinación de datos.

Una vez que se han introducido los datos necesarios para iniciar la simulación, dentro de la interfaz del modelo de “Data combination” debemos seleccionar los datos que hemos introducido para comenzar la simulación (Figura 33).

The screenshot shows the SIMDualKc software interface with two tabs: "Data Combination" and "Results". The "Data Combination" tab is active and contains the following sections:

- Combined Data - Soil Water Balance:** Name/ID: ComprobacionT3_FWajustado22
- Soil:** Name/ID: Vinha_Orden_ (dropdown); Initial depletion in evaporable layer (% of TEW): 0 (dropdown); Initial depletion in the layers below (% of TAW): 0 (dropdown)
- Irrigation Options:** Name/ID: Vinha_orden_aplicado_2022_T03_0,127 (dropdown)
- Active Ground Cover:** Radio buttons for "No active ground cover" (selected) and "Active ground cover"; Name/ID: (dropdown)
- Capillary Rise and Deep Percolation:** Radio buttons for "Use null CR and default DP" (selected) and "Use a CR and DP computation method"; Name/ID: (dropdown)
- Climate:** Name/ID: Vinha_Orden_Estación_2022 (dropdown)
- Crop:** Radio buttons for "Single crop" (selected) and "Intercropping"; Single crop Name/ID: Vinha_Orden_Crop_ (dropdown); Intercropping Name/ID: (dropdown)
- Precipitation Runoff:** Radio buttons for "Runoff not considered" (selected) and "Runoff considered"; Name/ID: (dropdown)
- Mulches:** Radio buttons for "No mulch" (selected) and "Mulch"; Name/ID: (dropdown)
- Soil Water Salinity:** Radio buttons for "Salinity not considered" (selected) and "Salinity considered"; Name/ID: (dropdown)

At the bottom of the interface, there are navigation buttons: <<, <, >, >>, a "Start Simulation" button, and a row of buttons: "New", "Edit", "Save", "Delete", "Close".

Figura 33. Interfaz de combinación de datos e inicio de simulación de modelo SIMDualKc (Fuente: datos propios, software: [86,87,167]).

Para ello, se establece un nombre identificativo a la simulación, se selecciona el suelo determinado, el valor del agotamiento inicial de la capa evaporable (%TEW) y de las capas de abajo (%TAW), el riego correspondiente a las diferentes frecuencias, la estación climática creada y el cultivo correspondiente.

Una vez seleccionado los datos para los cuales se quiere realizar la simulación se debe dar a “Start Simulation” para que se comience la simulación y poder ver en la pestaña de resultados la simulación correspondiente. De esta manera se podrá observar el valor de evaporación y transpiración de cada tratamiento de riego.

3.4. Medidas de potencial hídrico.

El potencial hídrico del tallo al medio día se mide en las hojas sanas del lado sombreado e inferior del dosel, cerca del tronco. Las hojas se envuelven en papel de aluminio dos horas antes del momento de medición (Figura 34). La hoja se intenta que no sea ni muy vieja ni nueva para que el diámetro del peciolo tenga un diámetro adecuado para que entre en la cámara tipo Scholander.



Figura 34. Hojas de vid envueltas en papel de aluminio preparándose para medidas de potencial hídrico (fuente: elaboración propia).

La medición se lleva a cabo con una cámara de presión tipo Scholander (Soil Moisture Corp., Model 3500, Santa Barbara, CA, USA) (Figura 35). La hoja se corta y se prepara en el tablero de preparación con una longitud del peciolo adecuada. Posteriormente, se sitúa en el recipiente con el porta muestras de tal manera que la longitud que sobresale del peciolo sea menor a 4 cm. Se coloca la tapa metálica del porta muestras, una vez situada la hoja en el recipiente a presión, a continuación, se regula la presión a aplicar y tras aplicar esta presión se mide observando con una lupa el momento en el que se produce la salida de la gota, anotando la presión registrada por el manómetro en ese momento. Para una mayor exactitud y evitar errores, el tiempo entre corte y medida debe ser inferior a un minuto.



Figura 35. Medidor de potencial hídrico tipo Scholander (Soil Moisture Corp, Santa Bárbara, California, USA) (fuente: elaboración propia).

La periodicidad de las repeticiones es semanalmente, se mide una hoja por planta, en dos plantas por parcela experimental, ocho plantas por cada tratamiento.

3.5. Medidas de conductancia estomática.

Para realizar las mediciones de conductancia estomática de la vid, se utiliza un porómetro foliar Decagon SC-1 (Decagon SC-1 leaf porometer (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA) (Figura 36).

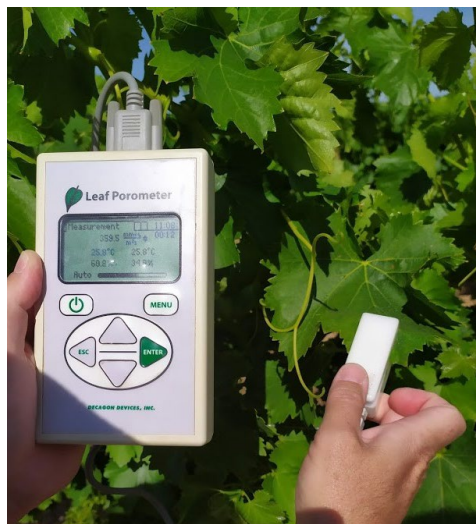


Figura 36. Porómetro foliar Decagon SC-1 para medida de conductancia estomática (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA) (fuente: elaboración propia).

Este Decagon SC-1 permite realizar la medida de conductancia estomática en 30 segundos, la medida se almacena en el aparato y posteriormente se puede descargar en el ordenador vía USB para su procesamiento posterior en un documento Excel.

Las medidas se toman en 4 hojas por parcela experimental, 16 hojas por cada tratamiento. La hora de medida es a las 11:00. Se obtiene un valor medio de medida de cada día tal manera que permite comparar los datos de medidas de días antes y después de riego.

3.6. Medidas de producción.

Para la evaluación de la medición en cada tratamiento, se cosecha manualmente las uvas en 10 cepas por cada parcela elemental, cosechando un total de 40 cepas por tratamiento.

Para la evaluación de la pesada se pesan por separado los racimos en una balanza electrónica digital. El valor obtenido por cepa (kg/cepa) se extrapola posteriormente en un documento Excel a toneladas por hectárea (t/ha).

3.7. Medidas de temperatura en UAV.

Para obtener las imágenes térmicas de la vid se utiliza una cámara de alta calidad con corrección radiométrica adecuada para un UAV DJI P4 (Figura 37). La cámara térmica integrada es Vue Pro 640, 32° de Campo de Visión (FOV), 19 mm, 9 hercios (Hz). Para poder realizar el vuelo y la toma de datos se necesita el UAV, la cámara térmica anteriormente citada integrada, el mando del UAV para poder realizar un control remoto, un dispositivo móvil para regular los parámetros del vuelo desde la aplicación DJI Go, una batería extra del dron por si es necesario y un visor de cámara térmica para poder ver la imagen térmica que se está capturando, por si es necesario realizar alguna corrección de posición.

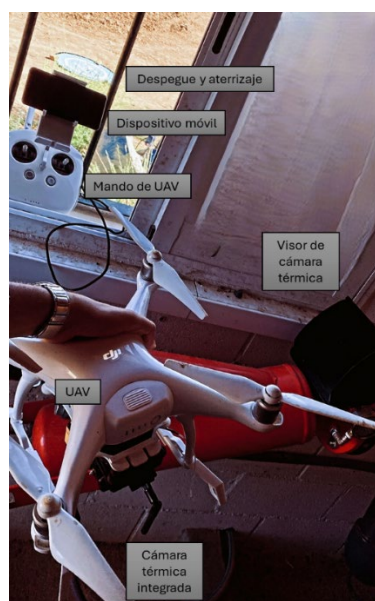


Figura 37. Vehículo aéreo no tripulado (dron) con cámara térmica integrada (fuente: elaboración propia).

Es importante comprobar que las baterías del dron y del mando de control están cargadas. Se debe encender el dron en un área abierta que no pueda tener interferencias. A continuación, desde la aplicación DJI Go desde el dispositivo móvil conectada al mando de control remoto mediante USB se verifican los parámetros de configuración. Se comprueban que la cámara, sensores y alas del dron están colocados correctamente. Para proceder se siguen las instrucciones de DJI Go para calibrar el dron y se comprueba que la conexión entre el dron y el mando está realizada correctamente, asegurarse de que la posición GPS es correcta y funciona adecuadamente. A continuación, se carga el plano con las características de vuelo y las imágenes que se desean tomar.

Es recomendable hacer el despegue y el aterrizaje de manera manual de tal forma que se realice sin incidencias y sobre una base plana que no pueda tener piedras o tierra que puedan dañar algún elemento del dron. Para el resto del vuelo el dron se puede poner en modo automático para realizar las capturas con la configuración establecida siempre manteniendo la vista en el dron en todo momento posible y en la pantalla del dispositivo térmico para comprobar que todo está funcionando adecuadamente.

Las imágenes térmicas se capturan al mediodía solar con una distancia de muestreo de suelo (GSD) de 3 cm/píxel. Para lograr este GSD, con las características de la cámaras citadas anteriormente, se toman imágenes mediante un vuelo a 30 m con un área de píxeles de 10 cm².

La interferencia entre las condiciones atmosféricas, el movimiento de la cámara durante el vuelo y la corrección radiométrica realizada por la cámara térmica del dron se verifica midiendo diferentes puntos de control tanto de tierra como de planta y paneles de calibración con diferentes características en campo con el termómetro apogee S411. Se realiza también, una línea de calibración en laboratorio para verificar la calidad de las imágenes obtenidas y los valores de temperatura.

Para procesar las imágenes térmicas del UAV se utiliza un programa denominado PIX4DMapper. Una vez que se cuenta con las imágenes descargadas en el ordenador, se debe abrir el programa, seleccionar un nuevo trabajo, poner el nombre al trabajo y ubicación de las carpetas en donde se desea guardar, posteriormente se añaden las fotografías en formato “.jpg” así como el video del vuelo si se dispone de él. Se establece precisión de las imágenes geolocalizadas como estándar y se selecciona el modelo de cámara utilizada. Para continuar se selecciona las coordenadas de salida, se selecciona las unidades de medida y se busca la proyección que se utiliza en la toma de puntos de apoyos. Después se comienza

con el proyecto térmico seleccionando la plantilla cámara térmica. A continuación, se realiza un procesamiento inicial, se introducen puntos de apoyo y se reoptimiza. Se establece una nube de puntos y malla, clasificando los puntos, procesándose y posteriormente se obteniéndose el ortomosaico.

Una vez obtenido el ortomosaico térmico se procesa mediante el software QGIS 3.30.1 para obtener los valores de temperatura de dosel de los distintos tratamientos y poder comparar el valor con otras medidas (Figura 38).

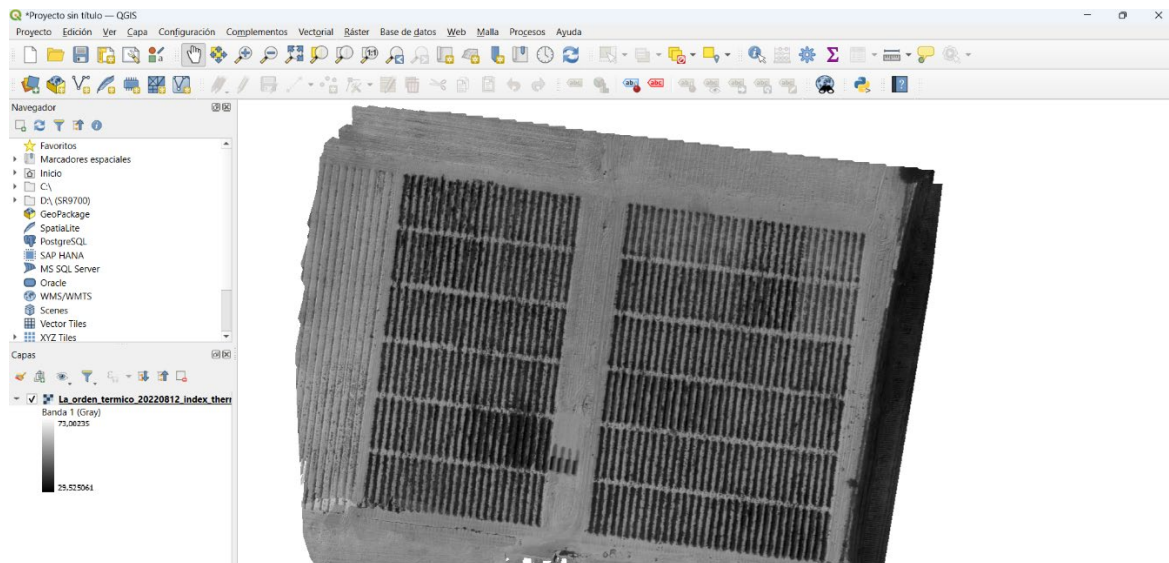


Figura 38. Ortomosaico térmico cargado en el software QGIS 3.30.1. para su procesamiento (fuente: elaboración propia).

Para obtener esta temperatura de dosel, se selecciona la herramienta “vector”, a continuación “geoprocesamiento” y “buffer”. A continuación, dentro de la configuración de estos parámetros del buffer, se selecciona buffer lineal con una distancia a ambos lados de 0,5 m, obteniéndose de esta manera información de 1 m de dosel. Una vez que se crea el citado buffer, se abre la tabla de atributos de la capa buffer y se agrega un nuevo campo, utilizándose la herramienta de estadísticas de campo para calcular la temperatura promedio del buffer realizado. Para esto se selecciona y ejecuta “vector”, “estadística de campo” y “promedio” en el grupo de estadísticas para la capa buffer.

Una vez que se obtiene el valor de la temperatura de dosel por cada fila, los datos se pasan a un documento Excel para facilitar la agrupación y procesamiento estadístico. Para asegurar una medida más representativa se toman 3 medidas por bloque, con cuatro medidas por cada tratamiento.

Capítulo 4. Artículo científico: Assessing Effect of Irrigation Frequency on Evaporation and Transpiration in Vineyards Using SIMDualKc Simulation Model with Measured Wet Fraction .

4.2. Referencia completa, factor de impacto y categorización de la publicación.

Referencia completa.

Autores: Esteban-Sanchez, G.¹, Campillo, C.², Uriarte, D.² y Moral, F. J.³.

Afiliación: 1. Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Escuela de Ingenierías Agrarias, Campus de Badajoz, Universidad de Extremadura, N-523, 06007, Badajoz, España. 2. Finca La Orden, Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), Ctra. A-V Km 372, 06187, Guadajira, España. 3. Departamento de Expresión Gráfica, Escuela de Ingenierías Industriales, Campus de Badajoz, Universidad de Extremadura, Avenida de Elvas s/n, 06006 Badajoz, España.

Título: Assessing Effect of Irrigation Frequency on Evaporation and Transpiration in Vineyards Using SIMDualKc Simulation Model with Measured Wet Fraction.

Año: 2024.

Revista, volumen, issue, página: Agronomy, 14(7), 1468.

Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy14071468>

Referencia completa: Esteban-Sanchez, G., Campillo, C., Uriarte, D., & Moral, F. J. (2024). Assessing Effect of Irrigation Frequency on Evaporation and Transpiration in Vineyards Using SIMDualKc Simulation Model with Measured Wet Fraction. *Agronomy*, 14(7), 1468. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071468>

Factor de impacto y categorización de la publicación.

Current Impact Factor: 3,3

5-Year Impact Factor: 3,7

CiteScore: 6,2

JCR Category Rank: Q1. Agronomy.

4.2. Resumen y publicación completa.

Resumen.

La eficiencia del riego es importante para el medio ambiente y la economía. SIMDualKc es un modelo de simulación que ha sido utilizado anteriormente de forma eficaz para calcular la evaporación y la transpiración por separado en viñedos para diferentes estrategias de riego, pero no para analizar el impacto de la frecuencia de riego. Este estudio se realizó para el ajuste en campo de la fracción húmeda del suelo (w_f) con un sensor Time Domain Reflectometry (TDR) en función de diferentes tratamientos de frecuencia de riego (T03, T07 y T15 con riego cada 3, 7 y 15 días, respectivamente). Los valores de evaporación y transpiración se estimaron por separado con el modelo SIMDualKc para diferentes frecuencias de riego con la w_f ajustado, comparándolos con las mediciones de campo del viñedo y analizando el efecto de las diferentes frecuencias de riego sobre el rendimiento del viñedo. La w_f en T15 fue superior a la de T07, que a su vez fue superior a la de T03. SIMDualKc indica que el tratamiento más desfavorable es el T07, con mayor evaporación y menor transpiración que el T15 y el T03, mientras que el T15 tuvo mayor evaporación y menor transpiración que el T03. Aunque la conductancia estomática también indica que el caso más desfavorable es el T07, no se encontraron diferencias claras entre el T03 y el T15. No se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento. Los resultados indican que las diferencias observadas entre frecuencias de riego no son reflejadas en el rendimiento, pero sí en la eficiencia en el uso del agua.





Abstract.

Irrigation efficiency is important for the environment and the economy. SIMDualKc has been effectively used to calculate evaporation and transpiration separately in vineyards for different irrigation strategies, but not to analyze the impact of irrigation frequency. This study was conducted for the in-field adjustment of the soil wetted fraction (w_f) with a time domain reflectometry (TDR) sensor as a function of different irrigation frequency treatments (T03, T07, and T15 with irrigation every 3, 7, and 15 days, respectively). Evaporation and transpiration values were estimated separately with the SIMDualKc model for different irrigation frequencies with the adjusted w_f , comparing them with vineyard field measurements and analyzing the effect of different irrigation frequencies on vineyard yield. The w_f in T15 was higher than that in T07, which in turn was higher than that in T03. SIMDualKc indicates the most unfavorable treatment to be the T07, with higher evaporation and lower transpiration than T15 and T03, while T15 had higher evaporation and lower transpiration than T03. Although stomatic conductance also indicates the most unfavorable case to be T07, no clear differences were found between T03 and T15. No statistically significant differences were obtained in yield. The results indicate that the differences observed between irrigation frequencies are not reflected in yield but do show up in water use efficiency

Publicación completa.

Article

Assessing Effect of Irrigation Frequency on Evaporation and Transpiration in Vineyards Using SIMDualKc Simulation Model with Measured Wet Fraction

Gonzalo Esteban-Sanchez ^{1,*}, Carlos Campillo ², David Uriarte ² and Francisco J. Moral ³

¹ Department of Agricultural and Forestry Engineering, School of Agricultural Engineering, University of Extremadura, Badajoz Campus, N-523, 06007 Badajoz, Spain

² Finca La Orden, Centre for Scientific and Technological Research of Extremadura (CICYTEX), Ctra. A-V, Km 372, 06187 Guadajira, Spain; carlos.campillo@juntaex.es (C.C.); david.uriarte@juntaex.es (D.U.)

³ Department of Graphic Expression, School of Industrial Engineering, University of Extremadura, Badajoz Campus, Avenida de Elvas s/n, 06006 Badajoz, Spain; fjmoral@unex.es

* Correspondence: goestebans@unex.es

Abstract: Irrigation efficiency is important for the environment and the economy. SIMDualKc has been effectively used to calculate evaporation and transpiration separately in vineyards for different irrigation strategies, but not to analyze the impact of irrigation frequency. This study was conducted for the in-field adjustment of the soil wetted fraction (*wf*) with a time domain reflectometry (TDR) sensor as a function of different irrigation frequency treatments (T03, T07, and T15 with irrigation every 3, 7, and 15 days, respectively). Evaporation and transpiration values were estimated separately with the SIMDualKc model for different irrigation frequencies with the adjusted *wf*, comparing them with vineyard field measurements and analyzing the effect of different irrigation frequencies on vineyard yield. The *wf* in T15 was higher than that in T07, which in turn was higher than that in T03. SIMDualKc indicates the most unfavorable treatment to be the T07, with higher evaporation and lower transpiration than T15 and T03, while T15 had higher evaporation and lower transpiration than T03. Although stomatic conductance also indicates the most unfavorable case to be T07, no clear differences were found between T03 and T15. No statistically significant differences were obtained in yield. The results indicate that the differences observed between irrigation frequencies are not reflected in yield but do show up in water use efficiency.

Keywords: SIMDualKc simulation model; reflectometry sensors; stomatal conductance; irrigation frequency; evaporation; transpiration; wetted fraction



Citation: Esteban-Sanchez, G.; Campillo, C.; Uriarte, D.; Moral, F.J. Assessing Effect of Irrigation Frequency on Evaporation and Transpiration in Vineyards Using SIMDualKc Simulation Model with Measured Wet Fraction. *Agronomy* **2024**, *14*, 1468. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071468>

Academic Editor: Mario Cunha

Received: 30 May 2024

Revised: 4 July 2024

Accepted: 5 July 2024

Published: 6 July 2024



Copyright: © 2024 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

One of the main challenges facing viticulture today is water scarcity [1]. Vineyard cultivation in arid and semi-arid areas is limited by water availability and water use efficiency is important for the proper development of crops [2,3]. The effect of different irrigation strategies on vine cultivation has been demonstrated, especially with respect to controlled deficit irrigation [4–11]. Crop forcing techniques and irrigation strategies are important and have been studied in vineyards [12]. However, water use efficiency can be affected by different factors which need to be considered in detail.

One of the most important factors when scheduling irrigation is its frequency. Due to differences in soil moisture caused by different irrigation frequencies, some studies have shown positive crop responses under high-frequency drip irrigation [13]. However, another study has shown that the greater the amount of irrigation applied, the greater the efficiency when the frequency of irrigation is reduced, raising doubts about the use of high-frequency irrigation in semi-arid areas [14]. Other studies have shown better results with lower irrigation frequencies in terms of sap flow measured transpiration [15].

Another study analyzed irrigation frequency in vineyards based on water potential and canopy temperature. Clear differences were found between irrigated vines, which showed less stress, and non-irrigated vines, which showed more stress, but not between different frequencies, with less stressed plants only in some cases also having lower irrigation frequencies [16]. In a different study, greater plant stress was associated with higher irrigation frequency when a particular amount of water was applied. However, when larger amounts were applied no differences were observed between different frequencies, showing that the influence of irrigation frequency may also depend on the total amount of water applied [17]. In addition, in an analysis of irrigation frequency in vineyards, it was concluded that yield and efficiency depend on the variety, location, and year [18]. Given this variability, using a reliable technique and field measurements, it is important to study the effect of irrigation frequency in a semi-arid area in which the grapevine is a crop of great importance.

Soil behaves as a water store into and out of which water flows. While irrigation and precipitation provide water for the root zone, some water may be lost through surface runoff and deep percolation eventually recharges the permeability layer. Water can be transported to the surface by capillary action or transferred horizontally from inside to outside the root zone in the case of steep slopes. Importantly, some irrigation and precipitation water can be lost through direct evaporation from the soil or transpiration of the crop, the sum of which is known as crop evapotranspiration (ET_c). It is important to pay attention to the water needs of each crop and to know its ET_c. The ET_c is the result of multiplying the reference evapotranspiration (ET_o) by a crop coefficient (K_c) that may depend on different crop-specific factors. To observe irrigation efficiency, it is possible to use the dual crop coefficient technique, in which evaporation and transpiration can be obtained separately. Evaporation is the result of multiplying the ET_o by an evaporation coefficient (K_e), while transpiration is the result of multiplying the ET_o by a basal crop coefficient (K_{cb}) [19]. Different K_{cb} values have been obtained according to different physical factors of the vine plant [20]. With this dual crop coefficient approach, it can be seen that the ET_c is partly lost through evaporation from the soil and partly through transpiration of the plant [19].

This partitioning of the dual crop coefficient can be studied with simulation models such as SIMDualK_c [21,22]. This model allows the separate calculation of evaporation and transpiration. It is important to increase the transpiration of the crop in relation to total water use. For this purpose, simulation models like SIMDualK_c can be considered appropriate [23]. Plant measurements, such as stomatal conductance, can also be used to assess stomatal behavior, which is related to water availability in the crop [24].

Evaporation and transpiration have been studied with SIMDualK_c considering different irrigation agronomic strategies and taking into account factors such as the amount of irrigation, the presence of vegetation cover, and crop height in the vineyard. However, in these studies, water balances were carried out without studying different irrigation frequencies [23,25–28].

Other techniques employed in analyses of evaporation and transpiration include the use of eddy covariance, microlysimeters, and sap flow sensors [29]; the WaLIS model [30], satellite imagery and vegetation indices [31]; and sap flow sensors, minilysimeters, neutron probes, and a time domain reflectometry (TDR) sensor [32]. However, in these studies, no consideration was given to the effect of differences between irrigation frequencies.

While some studies have evaluated the frequency of irrigation in vineyards, they have not used SIMDualK_c to analyze the effect on evaporation and transpiration separately. The studies that have been conducted on the impact of irrigation frequency have been performed based on sap flow measurements [15], water potential and leaf temperature [16], weighing lysimeters [14], water potential, the leaf area index (LAI), and yield [17] or quality parameters [18]. That is, there are no known studies in which the effect of the frequency of irrigation in vineyards on evaporation and transpiration has been analyzed with SIMDualK_c, which is a novel contribution of the present study. In addition, it is considered important to adjust the requirements of the developed model with field measurements.

One of the variants that can be affected by differences in irrigation frequency is the soil wetted fraction (wf). The wf is the surface of soil moistened by irrigation or rainfall. It takes a value between 0 and 1, with 1 meaning that the soil surface is completely wet and 0 meaning it is completely dry. The analysis of the wf produced by irrigation is very important because it can affect the evaporation and transpiration of the crop and the efficient use of water. Factors such as direct solar radiation, air temperature, atmospheric humidity, and wind speed influence soil water evaporation. The depth of the soil layer that is subject to drying through evaporation is between 0.1 and 0.15 m. If the wf is high, it can cause there to be more exposed soil area to be evaporated and, therefore, water may be lost without being used. In addition, the water content of the soil and its ability to conduct the water to the roots can determine the rate of crop transpiration [19].

When the irrigation frequency is low, more water needs to be applied in each irrigation event to maintain the total overall amount of water applied, and therefore there must be variations in the wf [33]. However, if we select drip irrigation in SIMDualKc, a wf of 0.4 is automatically incorporated in the model as it is the default wf in the start-up of the model [21,22]. Therefore, if irrigation type, amount, and frequency are varied, this wf should also vary, and this may affect crop evaporation and transpiration. Consequently, it is considered important to study the wf value of the zone itself based on the soil and climatic characteristics. In this way, it is possible to enter the exact value observed in the field using the TDR sensor technique, which has been shown to be valid for measuring the water status in porous media such as soil [34,35]. This allows us to obtain a more realistic value of the evaporation and transpiration obtained from the different irrigation frequencies with SIMDualKc. As far as the authors of the present study are aware, this type of adjustment has not been made or studied in the literature. In addition, it is considered important to compare these results with field measurements that indicate crop development and yield.

The objectives of this study are as follows: (i) in-field adjustment of the wf with a TDR sensor in a vineyard according to different irrigation frequencies; (ii) separate estimation of evaporation and transpiration with the SIMDualKc model using different irrigation frequencies and adjusted wf values, comparing them with field measurements of the vineyard; and (iii) analysis of the effect of different irrigation frequencies on vineyard yield.

2. Materials and Methods

2.1. Description of the Trial

The experiment took place during the 2022 growing seasons in a 1.2-hectare experimental vineyard at Finca La Orden, Centre for Scientific and Technological Research of Extremadura (CICYTEX), in southwestern Spain. The vineyard, consisting of cv. Red Grenache (*Vitis vinifera* L.) grafted on 420A rootstock, was characterized by a semi-arid climate. The vines, aged 5 years, were trained as Royat bilateral cordons in a vertical trellis system. Winter pruning reduced each vine to eight spurs and 2 buds (16 buds per vine), while early spring adjustments maintained 16 shoots per vine. Row and vine spacing were set at 3.0 m and 1.4 m, respectively, and orientation was N-S. Surface drip irrigation was used, with an arrangement of raised rubber bands held in place by a wire. Each dripper was 0.7 m apart and had a flow rate of 4 L/h, with two drippers per vine.

Three treatments were selected to evaluate the effect of different irrigation frequencies: T07, the control treatment, comprised the application of 30% of ETo from pea size to harvest with an irrigation frequency every seven days. ETo was calculated on the basis of the measurements of a meteorological station close (distance less than 1 km) to the test plot, following the Penman–Monteith method. T03 and T15 had the same irrigation volume as T07, but with an irrigation frequency every three days and fifteen days, respectively.

Table 1 shows the irrigations established in the different treatments from the onset of irrigation with the fruit at pea size until the time of harvest.

Table 1. Number of irrigation days, average irrigation per day (mm), and total pre-harvest irrigation (mm) in each irrigation treatment in the vineyard.

Treatment	Number of Irrigation Days	Average Irrigation for an Irrigation Event (mm)	Total Irrigation (mm)
T03	25	6.94	173.40
T07	13	13.19	171.53
T15	6	28.99	173.98

Each treatment was repeated in four randomized blocks so that the effect of soil texture on the *wf* of soil could be analyzed. Table 2 shows the soil textures of each block in the first 0.30, 0.60, and 0.90 m, analyzed through the realization of a pit and a subsequent texture analysis in the laboratory.

Table 2. Soil texture at different depths (0.30, 0.60, and 0.90 m).

Depth (m)	Block	Texture
0.3	I	Sandy clay loam
0.3	II	Sandy clay loam
0.3	III	Sandy loam
0.3	IV	Sandy loam
0.6	I	Sandy clay loam
0.6	II	Sandy clay loam
0.6	III	Sandy clay loam
0.6	IV	Sandy loam
0.9	I	Clay loam
0.9	II	Sandy clay loam
0.9	III	Sandy clay loam
0.9	IV	Sandy loam

2.2. Measurements of the Soil Wetted Fraction (*wf*)

A template was used (Figure 1) to obtain the soil wetted fraction data for each treatment (T3, T07, and T15). The template comprised a piece of cardboard lined with plastic to prevent it from deteriorating due to humidity. This 1.5 m long and 0.7 m wide cardboard template, with a surface area of 1.05 m², contained 33 holes, spaced horizontally at a distance of 0.35 m and vertically at a distance of 0.15 m. All distances refer to the center of the holes.

The template was placed on either side of the dripper, with the longest part towards the space between rows of plants (Figure 1), so that 1.05 m² was obtained from one side of the dripper and then another 1.05 m² from the other side of the dripper. In this way, the percentage of *wf* of half of the planting frame (2.1 m²) could be extrapolated to the total planting frame because there were two drippers between two plants in the same row.

A FieldScout TDR 350 sensor (Spectrum Technologies, Inc., Aurora, IL, USA) was used to collect moisture data from each borehole (Figure 1). This sensor works by emitting electromagnetic pulses through the soil and measuring the time they take to return. This time is proportional to the dielectric constant of the air–water–soil medium, which varies with humidity. The measurement depth of the sensor was 4.8 inches (0.12 m), as this is the depth of the soil susceptible to drying through evaporation [19].

The TDR sensor data were taken on 27 July and 10 August 2022, corresponding with two irrigation events when the three irrigation frequencies coincided. The measurements were made with drippers located next to the vine plants, distributed in three groups according to the irrigation intervals: 4 drippers for T03, 4 drippers for T07, and 4 drippers for T15. The measurements were repeated in each block to consider the variability in the soil texture.

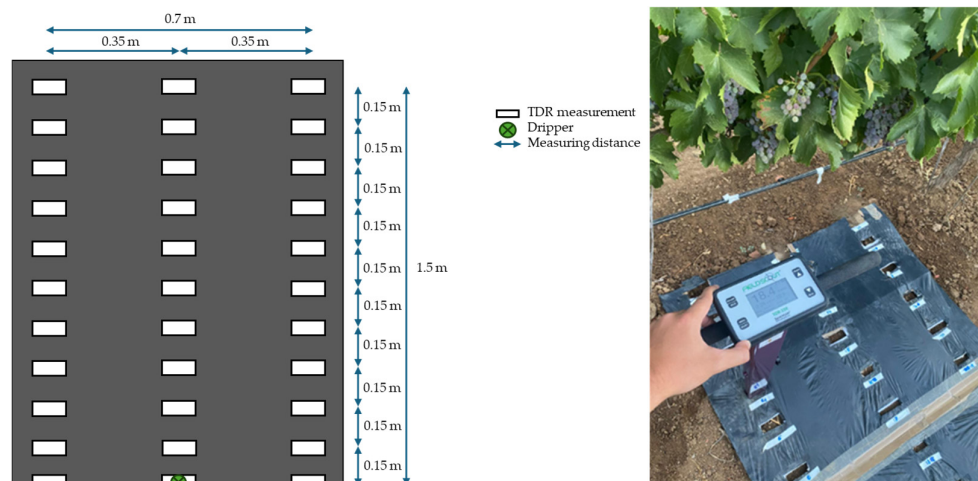


Figure 1. Template dimensions (m) used to measure the wetted fraction (wf) of soil with a dripper with a FieldScout time domain reflectometry (TDR) 350 sensor (Spectrum Technologies, Inc., Aurora, IL, USA) ready to measure in the field.

All data obtained with the TDR sensor were processed to determine the wf value for each treatment. For this purpose, an area was considered to be wet if it had a hole with a moisture content greater than 16.5%. For example, if all 66 holes were found to have a moisture content greater than 16.5%, then the soil wf percentage would be 100%. The average wf value per block and treatment was obtained, as well as the wetted area per dripper and plantation frame, in m^2 . The wf value obtained in each treatment was then manually entered into the SIMDualKc model interface to adjust the drip-irrigated soil wf value with a real value observed in the field.

2.3. Estimation of Evaporation and Transpiration

The tool used to calculate evaporation and transpiration was the SIMDualKc (Lisbon, Portugal) simulation model, which allows ET_c to be calculated dually by separating K_e and K_{cb} [21,22]. To start the estimation in the simulation model, the following soil, climate, crop, and irrigation data were entered:

- **Soil:** The total available water (TAW) (mm/m) was introduced directly in SIMDualKc according to the values established by FAO56 [19] depending on the textures of the three layers (0–0.30 m, 0.30–0.60 m, 0.60–0.90 m) (Table 2). Total evaporable water (TEW) (mm/m) and readily evaporable water (REW) (mm/m) were also introduced in SIMDualKc according to the values established by FAO56 [19] as a function of soil texture at the 0.10 m depth. The absence of vegetation cover between rows on the plot was indicated.
- **Climate:** The precipitation (mm), ET_o calculated according to the Penman–Monteith method (mm), minimum daily relative humidity (mm), average daily wind speed (m/s), latitude (m), altitude (m), and anemometer height (m) of a nearby meteorological station (distance less than 1 km) were entered.
- **Crop:** To evaluate crop development, the growth stages according to FAO56 were determined through weekly phenological monitoring. The depth of the root (m) was measured in the pit made to determine the characteristics of the soil, as well as the height of the plant (m), employing a telescopic measuring rod. The p-fraction value was taken from the reference value set by FAO56 for the cultivation of vines and their varieties for wine production. To adjust the fraction of crop cover in the model, the LAI value was measured four times during the growing season with an LAI-2200 plant canopy analyzer (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) on two vines per experimental plot (eight vines per treatment), in accordance with [36]. To evaluate the K_{cb} , the stomatal sensitivity function (Fr) value was used with an adjustment relative to stomatal control

applied as a function of water stress measured by the leaf water potential at solar noon with a Scholander-type pressure chamber (Soil Moisture Corp., Model 3500, Santa Barbara, CA, USA).

- Irrigation: Through the programming option chosen by the user, three irrigation schedules were established throughout the campaign in which the same volume of water, corresponding to 30% of the ETo, was applied but distributed in different frequencies (T03, T07, and T15). That is, the volume of water applied in each irrigation and the time between irrigations varied between the different irrigation schedules. However, overall, the total amount of water applied was the same (Table 1). This SIMDualKc simulation model establishes by default that if the irrigation is by drip, the wf of the irrigation is 0.4 (40%). However, in this study, as this depended on each irrigation treatment, the actual value observed in the field for T03, T07, and T15 was introduced.

In addition to the analysis with the SIMDualKc model, plant measurements were also analyzed. In this case, stomatal conductance was determined using a Decagon SC-1 leaf porometer (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA) on 4 leaves per elemental plot (16 leaves per irrigation treatment) to subsequently obtain a mean value per day measured at 11:00 a.m. Measurements were taken on 16 days during the campaign, at times before and after irrigation days.

2.4. Yield Evaluation

The yield was evaluated in each treatment (T03, T07, T15) on 10 vines per elemental plot (40 vines per treatment). All the bunches of each vine were separately weighed with a digital electronic scale, and the value obtained in kilograms per vine (kg/vine) was subsequently extrapolated to tons per hectare (t/ha). Manual harvesting took place on 29 August, with the last irrigation event on 24 August.

3. Results and Discussion

3.1. Wetted Fraction (wf) of the Soil from the Different Treatments with the TDR Sensor

The TDR-measured wf results in each treatment are shown in Table 3. The values correspond to the upper 0.12 m as this is the soil depth susceptible to drying through evaporation [19].

Table 3. Wetted fraction (wf) of soil from each treatment on two different dates (as a decimal), average wf of the two dates (as a decimal), average wf per treatment (as a decimal), wetted area per dripper (m^2), and wetted planting frame area measured by two drippers (m^2).

Treatment	Block	Texture (0.3 m)	wf (27 July 2022)	wf (10 August 2022)	wf (Average of Dates)	wf (Average per Treatment)	Wetted Area per Dripper (m^2)	Wetted Planting Frame Area (m^2)
T03	I	Sandy clay loam	0.076	0.136	0.106	0.127	0.133	0.266
T03	II	Sandy clay loam	0.242	0.258	0.250			
T03	III	Sandy loam	0.061	0.061	0.061			
T03	IV	Sandy loam	0.076	0.106	0.091			
T07	I	Sandy clay loam	0.394	0.439	0.417	0.424	0.445	0.891
T07	II	Sandy clay loam	0.409	0.424	0.417			
T07	III	Sandy loam	0.333	0.439	0.386			
T07	IV	Sandy loam	0.470	0.485	0.477			
T15	I	Sandy clay loam	0.788	0.742	0.765	0.665	0.698	1.396
T15	II	Sandy clay loam	0.697	0.621	0.659			
T15	III	Sandy loam	0.545	0.682	0.614			
T15	IV	Sandy loam	0.621	0.621	0.621			

As can be seen in Table 3, the T15 values are higher than the T7 values, and these in turn are higher than the T3 values. This concurs with the results of other studies in that the greater the amount of irrigation applied, the greater the horizontal distribution of water in the soil [33,37,38]. The amount of water applied each irrigation day is higher in T15 than in T7, and in T7 it is higher than in T3 (Figure 2).

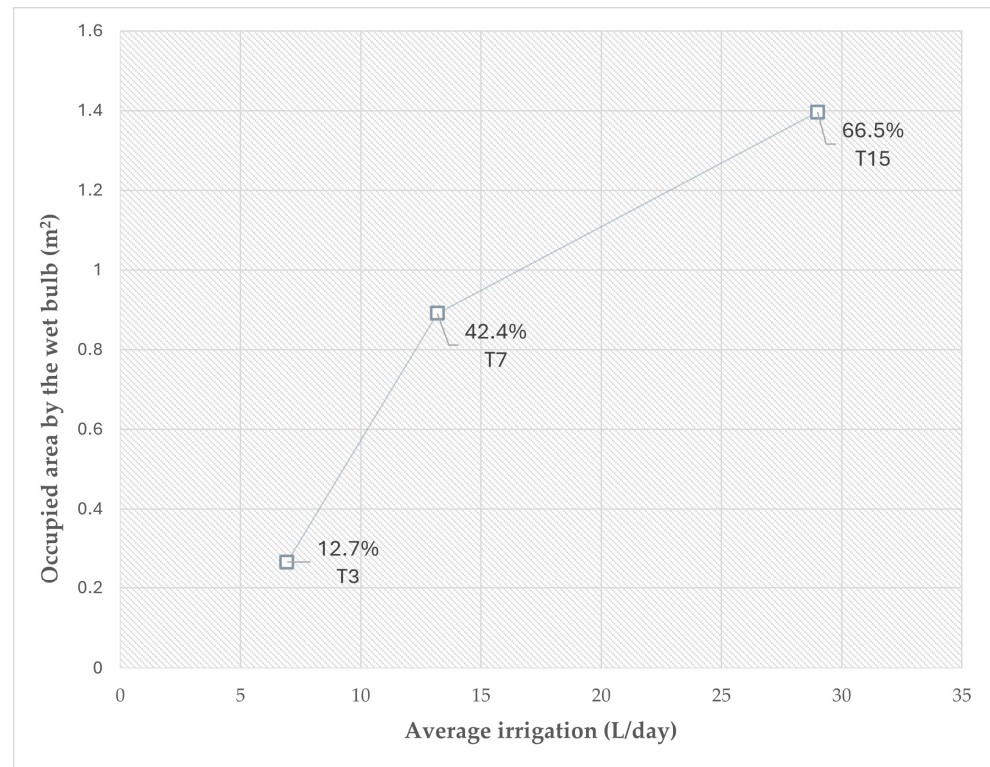


Figure 2. Wet bulb occupancy (m² and %) as a function of average irrigation (L/day).

In this way, it can be seen that, in this case in the SIMDualKc simulation model, 0.127 can be used for the T03 irrigation, 0.424 for the T07, and 0.665 for the T15, as the default wf setting is 0.4 when drip irrigation is selected [22].

In each treatment, taking into account the surface soil fraction, the sandy clay loam textures generally had similar but slightly higher wf values than the sandy loam textures. This can be attributed to finer particles retaining water more horizontally on the surface than coarser ones, as has been shown in other studies [33].

The analysis with a TDR sensor shows a real and adjusted field value, with higher wf values as the amount of water applied in each irrigation event increases and the frequency of application falls. It is therefore a reliable technique for this measurement of water in a porous medium such as soil, coinciding with the effectiveness of the TDR-based technique shown in other studies [34,35].

3.2. Estimation of Evaporation and Transpiration of Each Treatment with the SIMDualKc Model

Table 4 shows the evaporation and transpiration values obtained with the SIMDualKc model after introducing the wf observed in the field for each irrigation frequency (Table 3).

As can be seen in Table 4, no significant differences in ET were found between irrigation frequencies. However, it is interesting to see how irrigation frequency affects evaporation and transpiration with the wf observed in the field.

Table 4. Evapotranspiration (ET) (mm), transpiration (mm), evaporation (mm), and evaporation/ET (%) for each irrigation frequency (T03, T07, T15).

Irrigation Frequency	ET (mm)	Transpiration (mm)	Evaporation (mm)	% Evaporation over ET
T03	282.983	196.100	86.883	30.703
T07	281.246	156.800	124.446	44.248
T15	280.999	172.458	108.541	38.627

Firstly, evaporation is discussed, as this involves a loss of water that is not used. The results obtained (Table 4) are all within the range of values reported in other vineyard-based studies (from 8% to 60% of the ET), with the variation depending on different conditions [23,26,27,29,30,32]. The results of the present study show that T07, with an evaporation % of ET of 44.248%, had a higher value than the T15 treatment (38.627%), with the lowest irrigation frequency (T15), and the T03 treatment (30.703%), with the highest irrigation frequency.

This means that, in the case of this research, the least favorable case in terms of evaporation was the T07 treatment, and that less water was lost either by watering less frequently every three days (T03) or by watering more frequently and with a larger amount (T15). In a different study, it was found that applying three times more water in each irrigation event reduced the percentage of evaporation by 7% [14]. In the present research, this difference is similar to that between T07 and T15, with the application of approximately twice as much water in the T15 treatment resulting in a 5.621% reduction compared to the T07 treatment. However, the T03 result is contradictory, with lower evaporation than the other treatments. In another study, similar results were also found, obtaining better yields with shorter irrigation intervals, without waterlogging, allowing the water to be available for the roots [13]. According to other research, this may depend on the characteristics of each plot, with the specific interactions between vineyard practices and the efficiency obtained being difficult to predict [39]. This makes it important to analyze evaporation and transpiration separately, considering local characteristics.

Values similar to those obtained in this research have been found for high irrigation frequencies, with 29–31% [25,26] and 8–17% evaporation [27] reported when using daily drip irrigation with inter-row vegetation cover. In terms of evaporation values with less frequent irrigation, evaporation values of 52–59% were found with monthly gravity irrigation and of 49% with four and five seasonal gravity irrigations, both with plant cover between rows [32]. Evaporation of 40–45% was found with drip irrigation with the presence of vegetation cover in a study in which the frequency was not clearly specified but which considered the amount of annual irrigation and the amount of water applied per irrigation event, with many such events carried out in the campaign [23]. Evaporation values of 20–60% have also been found in rainfed research [29,30].

As for the effect of frequency on transpiration, the same trend was obtained as for evaporation, with T07 having the lowest transpiration in comparison with T15 and T03 and the latter having the highest value. To compare these results with plant measurements, Figure 3 shows the stomatal conductance values in plants from different irrigation frequencies.

As can be seen in Figure 3, the results of stomatal conductance coincide with the transpiration values shown in Table 4 in that T07 is the most negative case, with 87.5% of the conductance measurements lower than in T03 or T15 and 56.25% of the measurements lower than in T03 and T15. However, there is no clear trend between the T03 and T15 values, with one or the other higher depending on the day of measurement.

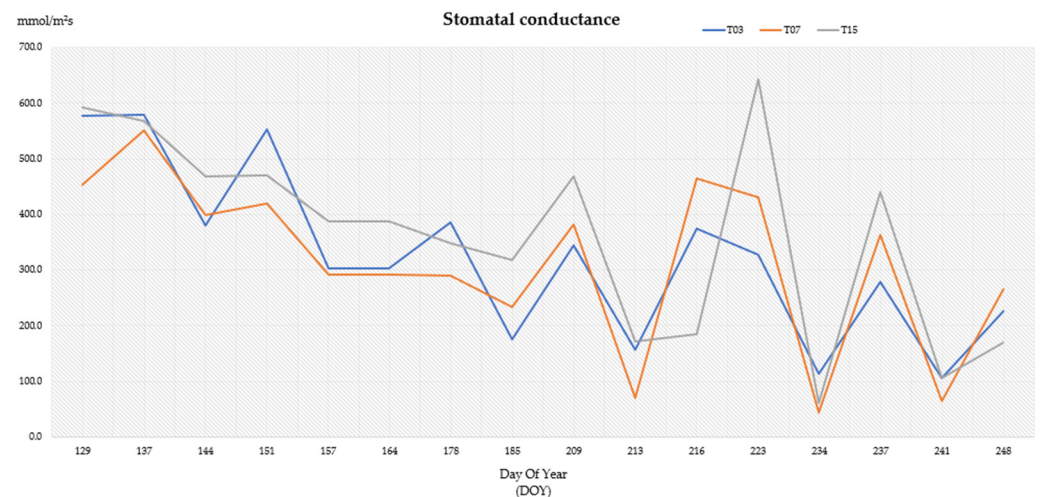


Figure 3. Stomatal conductance ($\text{mmol}/\text{m}^2\text{s}$) according to the day of the year (DOY) in plants of different irrigation frequency treatments (T03, T07, and T15).

As vineyards are crops that can be found in different areas, transpiration values can differ between locations due to differences in varieties, age, training, irrigation, soil cover, and crop management, as shown in vineyard reviews [20]. This means that the results of each study may differ due to a variety of factors.

According to one study using sap flow measurements, transpiration values increased with lower irrigation frequency [15]. In another study, on the same plot of the Finca la Orden as used in the present study and in the same year of study, the effect of irrigation frequency on canopy temperature and water potential was evaluated, also with irrigation every 3, 7, and 15 days. Differences were found between irrigated and non-irrigated vines, but there was no significant trend between irrigation frequencies [16].

One study considered the difference between the irrigation frequencies of vines irrigated every 2 and every 4 days, obtaining more stressed grapevine plants in terms of water potential with irrigation every 2 days compared to every 4 days based on an E_{To} of 0.2. However, when based on an E_{To} of 0.4, no differences were seen between irrigation frequencies in terms of plant stress measured with water potential [17].

Other parameters were evaluated in a study considering irrigation frequencies every day (T01), every 3 days (T03), every 7 days (T07), and every 15 days (T15), with differences found between the results for the different years, locations, and varieties [18]. For example, there were no significant differences in pH between irrigation frequencies of the different varieties, although for the red Grenache variety, the one considered in the present study, there was a non-significant increase in pH of 0.12 in T07 compared to T15. In terms of total soluble solids, there were only significant differences between irrigation frequencies in Tempranillo, with lower values found in T03 compared to T07 and T15 in only one year of the study. In Grenache, there was a non-significant difference between T07 and the rest of the treatments, but without a defined trend. As for total acidity, significant differences were found between T15 and T03 in the Tempranillo variety in one year, and in Grenache there was a slight non-significant difference between T15 and T03. Regarding tartaric acid, a positive significant difference was observed in the Mencia variety between T03 over T07 and in Grenache a non-significant difference was observed between T15 and T7 in one year. Regarding malic acid, there were no significant differences between irrigation frequencies in the different varieties, although in Grenache there was a non-significant difference between T07 and T15 in one year. In terms of potassium concentration, no significant differences were found between irrigation frequencies, although in Grenache a non-significant difference was found between T15 and T7 in one year. As for total polyphenols, there were no significant differences between frequencies in the different varieties, although in Grenache there was a non-significant difference between T15 and T07

in one of the years. This study concluded that the frequency of irrigation seems to have a reduced impact that can vary moderately depending on the variety and in some cases on the year [18].

The effect of irrigation frequency may be affected by many factors that are difficult to predict, but it is considered important to present the results in the case of the present local conditions.

3.3. Analysis of the Yield of Each Treatment

As for the yield analysis of each treatment, the data obtained are shown in Figure 4.

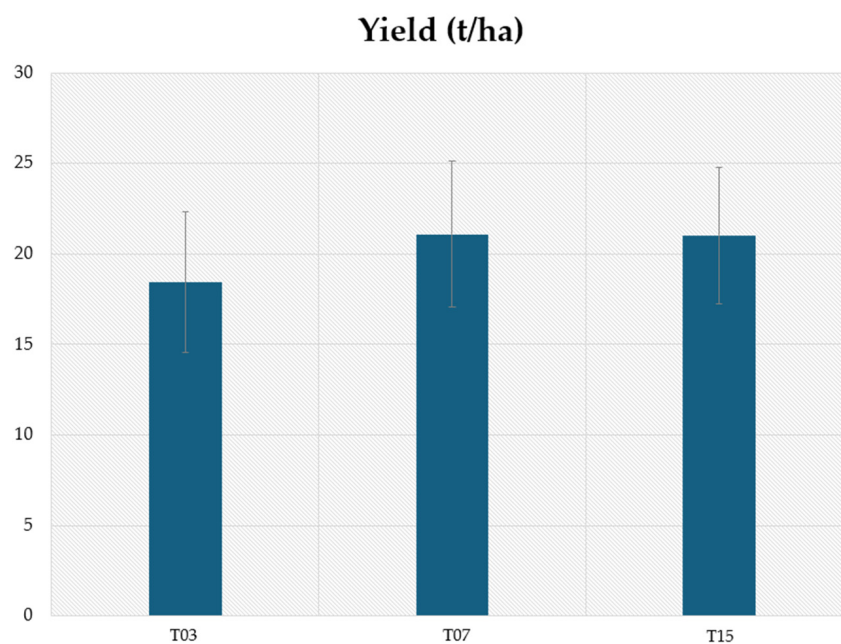


Figure 4. Yield (t/ha) of irrigation treatment every 3 days (T03), every 7 days (T7), and every 15 days (T15).

As can be seen in Figure 4, there are no significant differences in yield between irrigation frequency treatments. Therefore, in the case of this research, irrigation frequency did not affect the yield obtained. The average values of the T07 and T15 treatments are slightly higher than the T03 treatment, but the difference is not significant. Thus, the differences between the evaporation and transpiration values shown in Table 4 and the stomatal conductance measurements in Figure 3 are not reflected in terms of production. Although T07 had higher evaporation and lower transpiration values, it did not have a lower yield. Likewise, the two other treatments (T03 and T15) had higher transpiration and lower evaporation values but did not obtain higher yields.

In another study in which the yield was analyzed according to irrigation frequency, no significant differences in yield were found between the majority of the tested varieties. Although a significantly lower yield was found for the Syrah variety in the T07 compared to the T03 treatment, in the rest of the varieties the differences were small and non-significant and varied according to variety, location, and year [18].

In other research, higher yields were obtained in two years when irrigation frequency was four days compared to two days when applying an ETo of 0.20. However, when an ETo of 0.40 was applied no significant differences were found between irrigation frequencies, suggesting that the effect of irrigation frequency is small [17].

In another study carried out on the tomato crop, better yields were obtained when applying a specific amount of water with shorter irrigation frequencies, as long as there was no waterlogging. The authors recommended shorter irrigation frequencies when water is available in less-than-optimal amounts [13].

In summary, the impact of irrigation frequency on soil wf in the present study was found to be significant, with higher wf values corresponding to higher amounts of applied water and to lower irrigation frequencies. This result concurs with those of the different studies cited above. Evaporation values as a percentage of ET_c were found to be within the range reported in other studies. In addition, the T07 irrigation treatment was the least favorable compared to T15 and T03.

The difference between T07 and T15 coincides with some previous studies in vineyards cited above, in which more efficient results were obtained with lower frequencies. In this research, a positive efficiency was also obtained with T03, which could be due to the fact that small intervals without causing waterlogging can also make water efficiently available for the roots, as seen in previously cited studies. However, the differences between irrigation frequencies did not lead to significant changes in yield. This may be because one of the factors that can greatly affect yield is the amount of irrigation applied. It may be the case in the present study that in all the treatments the amount of water was greater than the crop needed, with the yield being similar despite each treatment losing different amounts of water to evaporation. This implies the need to evaluate the requirements of each crop in each local area.

The interaction between climatic factors, soil, varieties, crops, types of irrigation in terms of frequency and quantity, and agronomic strategies makes it difficult to predict or compare results. Nevertheless, such information can be considered important, inviting further research in this line and highlighting the importance of knowing irrigation efficiency results for different crops and in different areas.

4. Conclusions

The use of the TDR sensor allowed an in-field adjustment of the wf for the different tested irrigation frequencies, with higher wf values obtained with higher amounts of applied water in each irrigation event and lower irrigation frequencies. When irrigation was applied every 15 days, wf was higher (0.665) than when applied every 7 days (0.424) and every 3 days (0.127).

The SIMDualKc model allowed the calculation of evaporation and transpiration using the real wf measured in the field. The evaporation values obtained are within the range found in other studies. With the lowest irrigation frequency (T15 treatment), an evaporation value (expressed as a percentage of evapotranspiration) of 38.627% was obtained, which was lower than the 44.248% in the T07 treatment but higher than the 30.703% in the T03 treatment. As for transpiration, the plants with the lowest transpiration values were also irrigated every 7 days, followed by those irrigated every 15 days and those irrigated every 3 days. These transpiration results obtained with the SIMDualKc model concur with the data taken on plant stomatal conductance, with T07 values in this case generally lower than T03 and T15 values, but without clear differences between T03 and T15, depending on the day of measurement. These results are useful when considering the agronomic and soil characteristics contemplated in the present research. However, the widely varying results reported in other studies show that evaporation and transpiration can be affected by many factors, making them difficult to predict.

However, the differences described above are not reflected in the yield results for which no significant differences were found between the different irrigation frequencies. This may be due to all three irrigation frequency treatments providing sufficient total amounts of water for the crop. This may be attributed to the fact that the amount of irrigation influences crop yield, whereas the frequency of irrigation has not been demonstrated to affect yield, as indicated by some previous research. The combination of climatic factors, soils, crops, types of irrigation in terms of frequency and quantity, and agronomic strategies makes it difficult to predict results. Nonetheless, continuing with this line of research is important to determine more precisely how irrigation frequency affects vineyard yields and water use efficiency, in this way taking care of the environment, the economy, and therefore society. In this research, the SIMDualKc simulation model with wet fraction measured

with a TDR sensor has been useful in finding differences in evaporation and transpiration between irrigation frequencies. However, these differences did not subsequently manifest themselves in yield. Further research with TDR sensors and SIMDualKc is encouraged to see the effect of irrigation frequency in other areas and ensure that water is always available to the crop as needed.

Author Contributions: Conceptualization, G.E.-S., C.C., D.U. and F.J.M.; methodology, G.E.-S., C.C. and D.U.; software, G.E.-S.; validation, C.C. and D.U.; formal analysis, G.E.-S.; investigation, G.E.-S., C.C., D.U. and F.J.M.; resources, D.U.; data curation, G.E.-S. and C.C.; writing—original draft preparation G.E.-S.; writing—review and editing C.C., G.E.-S., D.U. and F.J.M.; visualization, G.E.-S., C.C., D.U. and F.J.M.; supervision, C.C., D.U. and F.J.M.; project administration, G.E.-S., C.C. and D.U.; funding acquisition, G.E.-S., C.C. and D.U. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Project PID2019-105039RR-C41/MCIN/AEI /10.13039/5011000111033 and the AGROS 2022 project, subsidized by the Regional Government of Extremadura co-financed by the ERDF, and the Ministry of Universities of Spain for University Professorship Training (FPU20/07314).

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article; further inquiries can be directed to the corresponding author.

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

References

- Mirás-Avalos, J.; Araujo, E. Optimization of Vineyard Water Management: Challenges, Strategies, and Perspectives. *Water* **2021**, *13*, 746. [[CrossRef](#)]
- Medrano, H.; Tomás, M.; Martorell, S.; Escalona, J.-M.; Pou, A.; Fuentes, S.; Flexas, J.; Bota, J. Improving Water Use Efficiency of Vineyards in Semi-Arid Regions. A Review. *Agron. Sustain. Dev.* **2015**, *35*, 499–517. [[CrossRef](#)]
- Van Leeuwen, C.; Roby, J.; De Rességuier, L. Soil-Related Terroir Factors: A Review. *OENO One* **2018**, *52*, 173–188. [[CrossRef](#)]
- Romero, P.; Navarro, J.M.; Ordaz, P.B. Towards a Sustainable Viticulture: The Combination of Deficit Irrigation Strategies and Agroecological Practices in Mediterranean Vineyards. A Review and Update. *Agric. Water Manag.* **2022**, *259*, 107216. [[CrossRef](#)]
- Mancha, L.A.; Uriarte, D.; Valdés, E.; Moreno, D.; Prieto, M.d.H. Effects of Regulated Deficit Irrigation and Early Cluster Thinning on Production and Quality Parameters in a Vineyard Cv. Tempranillo under Semi-Arid Conditions in Southwestern Spain. *Agronomy* **2020**, *11*, 34. [[CrossRef](#)]
- Bouzas-Cid, Y.; Falqué, E.; Orriols, I.; Mirás-Avalos, J.M. Effects of Irrigation over Three Years on the Amino Acid Composition of Treixadura (*Vitis vinifera* L.) Musts and Wines, and on the Aromatic Composition and Sensory Profiles of Its Wines. *Food Chem.* **2018**, *240*, 707–716. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Balint, G.; Reynolds, A.G. Irrigation Level and Time of Imposition Impact Vine Physiology, Yield Components, Fruit Composition and Wine Quality of Ontario Chardonnay. *Sci. Hortic.* **2017**, *214*, 252–272. [[CrossRef](#)]
- Romero, P.; García García, J.; Fernández-Fernández, J.I.; Muñoz, R.G.; del Amor Saavedra, F.; Martínez-Cutillas, A. Improving Berry and Wine Quality Attributes and Vineyard Economic Efficiency by Long-Term Deficit Irrigation Practices under Semiarid Conditions. *Sci. Hortic.* **2016**, *203*, 69–85. [[CrossRef](#)]
- Intrigliolo, D.S.; Pérez, D.; Risco, D.; Yeves, A.; Castel, J.R. Yield Components and Grape Composition Responses to Seasonal Water Deficits in Tempranillo Grapevines. *Irrig. Sci.* **2012**, *30*, 339–349. [[CrossRef](#)]
- Ferreira, M.I.; Silvestre, J.; Conceição, N.; Malheiro, A.C. Crop and Stress Coefficients in Rainfed and Deficit Irrigation Vineyards Using Sap Flow Techniques. *Irrig. Sci.* **2012**, *30*, 433–447. [[CrossRef](#)]
- Santesteban, L.G.; Miranda, C.; Royo, J.B. Regulated Deficit Irrigation Effects on Growth, Yield, Grape Quality and Individual Anthocyanin Composition in *Vitis vinifera* L. Cv. ‘Tempranillo’. *Agric. Water Manag.* **2011**, *98*, 1171–1179. [[CrossRef](#)]
- Lavado, N.; Prieto, M.H.; Mancha, L.A.; Moreno, D.; Valdés, M.E.; Uriarte, D. Combined Effect of Crop Forcing and Reduced Irrigation as Techniques to Delay the Ripening and Improve the Quality of Cv. Tempranillo (*Vitis vinifera* L.) Berries in Semi-Arid Climate Conditions. *Agric. Water Manag.* **2023**, *288*, 108469. [[CrossRef](#)]
- Freeman, B.M.; Blackwell, J.; Garzoli, K. V Irrigation Frequency and Total Water Application with Trickle and Furrow Systems. *Agric. Water Manag.* **1976**, *1*, 21–31. [[CrossRef](#)]
- Montoro, A.; Mañas, F.; López-Urrea, R. Transpiration and Evaporation of Grapevine, Two Components Related to Irrigation Strategy. *Agric. Water Manag.* **2016**, *177*, 193–200. [[CrossRef](#)]
- Scholasch, T. Improving Winegrowing with Sap Flow Driven Irrigation—A 10-Year Review. *Acta Hortic.* **2018**, *1222*, 155–168. [[CrossRef](#)]

16. Esteban-Sanchez, G.; Campillo, C.; Uriarte, D.; Moral, F.J. Technical Feasibility Analysis of Advanced Monitoring with a Thermal Camera on an Unmanned Aerial Vehicle and Pressure Chamber for Water Status in Vineyards. *Horticulturae* **2024**, *10*, 305. [[CrossRef](#)]
17. Sebastián, B.; Baeza, P.; Santesteban, L.G.; Sánchez de Iguel, P.; De La Fuente, M.; Lissarrague, J.R. Response of Grapevine Cv. Syrah to Irrigation Frequency and Water Distribution Pattern in a Clay Soil. *Agric. Water Manag.* **2015**, *148*, 269–279. [[CrossRef](#)]
18. Yuste, J.; Montoro, A.; Cancela, J.J.; Martínez-Porro, D.; Mancha, L.A.; Moreno, D.; Torija, I.; Rodríguez-Febrero, M.; Vilanova, M.; Uriarte, D. Irrigation Frequency in Red Varieties: Impact on Grape Production and Composition, during a Biennial Period, in 4 Regions of Spain. *BIO Web Conf.* **2023**, *68*, 01004. [[CrossRef](#)]
19. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. *FAO* **1998**, *300*, D05109.
20. 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](#)]
21. 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](#)]
22. 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](#)]
23. Darouich, H.; Ramos, T.B.; Pereira, L.S.; Rabino, D.; Bagagiolo, G.; Capello, G.; Simionesei, L.; Cavallo, E.; Biddoccu, M. Water Use and Soil Water Balance of Mediterranean Vineyards under Rainfed and Drip Irrigation Management: Evapotranspiration Partition and Soil Management Modelling for Resource Conservation. *Water* **2022**, *14*, 554. [[CrossRef](#)]
24. Gowdy, M.; Pieri, P.; Suter, B.; Marguerit, E.; Destrac-Irvine, A.; Gambetta, G.; van Leeuwen, C. Estimating Bulk Stomatal Conductance in Grapevine Canopies. *Front. Plant Sci.* **2022**, *13*, 839378. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Cancela, J.J.; Fandiño, M.; Rey, B.J.; Rosa, R.; Pereira, L.S. Estimating Transpiration and Soil Evaporation of Vineyards from the Fraction of Ground Cover and Crop Height -Application to “Albariño” Vineyards of Galicia. *Acta Hortic.* **2012**, *931*, 227–234. [[CrossRef](#)]
26. Cancela, J.J.; Fandino, M.; Rey, B.J.; Martinez, E.M. Automatic Irrigation System Based on Dual Crop Coefficient, Soil and Plant Water Status for *Vitis vinifera* (Cv Godello and Cv Mencia). *Agric. Water Manag.* **2015**, *151*, 52–63. [[CrossRef](#)]
27. Fandiño, M.; Cancela, J.J.; Rey, B.J.; Martínez, E.M.; Rosa, R.G.; Pereira, L.S. Using the Dual-Kc 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](#)]
28. Silva, S.P.; Isabel Valin, M.; Mendes, S.; Araujo-Paredes, C.; Cancela, J.J. Dual Crop Coefficient Approach in *Vitis vinifera* L. Cv. Loureiro. *Agronomy* **2021**, *11*, 2062. [[CrossRef](#)]
29. Zhao, P.; Kang, S.; Li, S.; Ding, R.; Tong, L.; Du, T. Seasonal Variations in Vineyard ET Partitioning and Dual Crop Coefficients Correlate with Canopy Development and Surface Soil Moisture. *Agric. Water Manag.* **2018**, *197*, 19–33. [[CrossRef](#)]
30. Celette, F.; Ripoche, A.; Gary, C. WaLIS—A Simple Model to Simulate Water Partitioning in a Crop Association: The Example of an Intercropped Vineyard. *Agric. Water Manag.* **2010**, *97*, 1749–1759. [[CrossRef](#)]
31. Campos, I.; Neale, C.M.U.; Calera, A.; Balbontín, C.; González-Piqueras, J. Assessing Satellite-Based Basal Crop Coefficients for Irrigated Grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.* **2010**, *98*, 45–54. [[CrossRef](#)]
32. 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](#)]
33. Bajpai, A.; Kaushal, A. Soil Moisture Distribution under Trickle Irrigation: A Review. *Water Supply* **2020**, *20*, 761–772. [[CrossRef](#)]
34. He, H.; Aogu, K.; Li, M.; Xu, J.; Sheng, W.; Jones, S.B.; González-Teruel, J.D.; Robinson, D.A.; Horton, R.; Bristow, K.; et al. A Review of Time Domain Reflectometry (TDR) Applications in Porous Media. *Adv. Agron.* **2021**, *168*, 83–155. [[CrossRef](#)]
35. He, H.; Zou, W.; Jones, S.B.; Robinson, D.A.; Horton, R.; Dyck, M.; Filipović, V.; Noborio, K.; Bristow, K.; Gong, Y.; et al. Critical Review of the Models Used to Determine Soil Water Content Using TDR-Measured Apparent Permittivity. *Adv. Agron.* **2023**, *182*, 169–219. [[CrossRef](#)]
36. Uriarte, D.; Intrigliolo, D.S.; Mancha, L.A.; Picón-Toro, J.; Valdes, E.; Prieto, M.H. Interactive Effects of Irrigation and Crop Level on Tempranillo Vines in a Semiarid Climate. *Am. J. Enol. Vitic.* **2015**, *66*, 101–111. [[CrossRef](#)]
37. Zhang, R.; Cheng, Z.; Zhang, J.; Ji, X. Sandy Loam Soil Wetting Patterns of Drip Irrigation: A Comparison of Point and Line Sources. *Procedia Eng.* **2012**, *28*, 506–511. [[CrossRef](#)]
38. Singh, D.K.; Rajput, T.B.S.; Singh, D.K.; Sikarwar, H.S.; Sahoo, R.N.; Ahmad, T. Simulation of Soil Wetting Pattern with Subsurface Drip Irrigation from Line Source. *Agric. Water Manag.* **2006**, *83*, 130–134. [[CrossRef](#)]
39. Scholasch, T.; Rienh, M. Review of Water Deficit Mediated Changes in Vine and Berry Physiology; Consequences for the Optimization of Irrigation Strategies. *OENO One* **2019**, *53*, 423–444. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Capítulo 5. Artículo científico. Technical Feasibility Analysis of Advanced Monitoring with a Thermal Camera on an Unmanned Aerial Vehicle and Pressure Chamber for Water Status in Vineyards.

5.1. Referencia completa y factor de impacto.

Referencia completa.

Autores: Esteban-Sanchez, G.¹, Campillo, C.², Uriarte, D.² y Moral, F. J.³.

Afiliación: 1. Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Escuela de Ingenierías Agrarias, Campus de Badajoz, Universidad de Extremadura, N-523, 06007, Badajoz, España. 2. Finca La Orden, Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), Ctra. A-V Km 372, 06187, Guadajira, España. 3. Departamento de Expresión Gráfica, Escuela de Ingenierías Industriales, Campus de Badajoz, Universidad de Extremadura, Avenida de Elvas s/n, 06006 Badajoz, España.

Título: Technical Feasibility Analysis of Advanced Monitoring with a Thermal Camera on an Unmanned Aerial Vehicle and Pressure Chamber for Water Status in Vineyards.

Año: 2024.

Revista, volumen, issue, página: Horticulturae, 10(3), 305.

Doi: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030305>

Referencia completa: Esteban-Sanchez, G., Campillo, C., Uriarte, D., & Moral, F. J. (2024). Technical Feasibility Analysis of Advanced Monitoring with a Thermal Camera on an Unmanned Aerial Vehicle and Pressure Chamber for Water Status in Vineyards. Horticulturae, 10(3), 305. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030305>

Factor de impacto y categorización de la publicación.

Current Impact Factor: 3.1.

5-year Impact Factor: 3.1.

Citescore: 3.5.

JCR Category Rank: Q1. Horticulture.

5.2. Resumen y publicación completa.

Resumen.

El agua es un factor limitante y para adoptar la estrategia agronómica más adecuada es necesario conocer el estado hídrico. El objetivo este trabajo es (i) analizar la influencia de diferentes tratamientos agronómicos sobre la temperatura del dosel en viñedos con una cámara térmica en un vehículo aéreo no tripulado (UAV), (ii) analizar la influencia de diferentes tratamientos agronómicos en el potencial hídrico de los viñedos con una cámara de presión tipo Scholander, (iii) análisis avanzado de viabilidad técnica de la monitorización de cultivo de viñedo. El tratamiento de control (T07) en cv. Garnacha consistió en aplicar el 30% de la evapotranspiración de referencia (ET_o) con frecuencia de riego cada siete días y se propusieron siete tratamientos con diferentes frecuencias de riego, con riego antes de la brotación y con distintas distribuciones de los pámpanos (T03, T15, T7A, T7V, T7P, T00 y T0P). El uso de cámaras térmicas en UAVs y el potencial hídrico del tallo a mediodía permite diferenciar entre tratamientos de regadío y seco, pero no se observaron diferencias claras entre las frecuencias de riego, con riego antes de la brotación o con las distintas distribuciones de los pámpanos. Comparando la información de la cámara térmica en UAV y el potencial hídrico del tallo, se identifican ciertos patrones con valores de correlación significativos, se recomienda el uso de cámaras térmicas para la evaluación del estado hídrico de las plantas, especialmente para obtener información en grandes áreas.

Abstract.

Water is a limiting factor and to adopt the most appropriate agronomic strategy it is necessary to know the water status. The objective is (i) analysing of the influence of different agronomic treatments on canopy temperature in vineyards with a thermal camera on an unmanned aerial vehicle (UAV), (ii) analysing of the influence of different agronomic treatments on vineyard water potentials with a pressure chamber, (iii) advanced technical feasibility analysis of vineyard crop monitoring. The control treatment (T07) in cv. Grenache consisted of applying 30% of reference evapotranspiration (ET_o) with irrigation frequency every seven days and seven different treatments were proposed with different irrigation frequencies, pre-bud irrigation, and vine shoot distribution (T03, T15, T7A, T7V, T7P, T00, and T0P). The use of thermal cameras in UAVs and mid-day stem water potential allows differentiation between irrigated and unirrigated treatments, but no clear differences were shown between irrigation frequencies, pre-irrigation treatment, or vine shoot distribution. Comparing the thermal camera information in UAV and the stem water potential, certain patterns are identified with significant correlation values, the use of thermal cameras for the evaluation of plant water status is recommended, especially to obtain information in large áreas.

Publicación completa.



Article

Technical Feasibility Analysis of Advanced Monitoring with a Thermal Camera on an Unmanned Aerial Vehicle and Pressure Chamber for Water Status in Vineyards

Gonzalo Esteban-Sanchez ^{1,*}, Carlos Campillo ², David Uriarte ² and Francisco J. Moral ³

¹ Department of Agricultural and Forestry Engineering, School of Agricultural Engineering, Badajoz Campus, University of Extremadura, N-523, 06007 Badajoz, Spain

² Finca La Orden, Centre for Scientific and Technological Research of Extremadura (CICYTEX), Ctra. A-V, Km 372, 06187 Guadajira, Spain; carlos.campillo@juntaex.es (C.C.); david.uriarte@juntaex.es (D.U.)

³ Department of Graphic Expression, School of Industrial Engineering, Badajoz Campus, University of Extremadura, Avenida de Elvas s/n, 06006 Badajoz, Spain; fjmoral@unex.es

* Correspondence: goestebans@unex.es

Abstract: Water is a limiting factor and to adopt the most appropriate agronomic strategy it is necessary to know the water status. The objective is (i) analysing of the influence of different agronomic treatments on canopy temperature in vineyards with a thermal camera on an unmanned aerial vehicle (UAV), (ii) analysing of the influence of different agronomic treatments on vineyard water potentials with a pressure chamber, (iii) advanced technical feasibility analysis of vineyard crop monitoring. The control treatment (T07) in cv. Grenache consisted of applying 30% of reference evapotranspiration (ET_0) with irrigation frequency every seven days and seven different treatments were proposed with different irrigation frequencies, pre-bud irrigation, and vine shoot distribution (T03, T15, T7A, T7V, T7P, T00, and T0P). As a result and in conclusion, the use of thermal cameras in UAVs and mid-day stem water potential allows differentiation between irrigated and unirrigated treatments, but no clear differences were shown between irrigation frequencies, pre-irrigation treatment, or vine shoot distribution. Comparing the thermal camera information in UAV and the stem water potential, certain patterns are identified with significant correlation values, the use of thermal cameras for the evaluation of plant water status is recommended, especially to obtain information in large areas.

Keywords: remote sensing technology; thermal camera; unmanned aerial vehicle (UAV); water status; temperature; pressure chamber; vineyard; agronomic treatments and irrigation frequencies; decision support systems



Citation: Esteban-Sanchez, G.; Campillo, C.; Uriarte, D.; Moral, F.J. Technical Feasibility Analysis of Advanced Monitoring with a Thermal Camera on an Unmanned Aerial Vehicle and Pressure Chamber for Water Status in Vineyards. *Horticulturae* **2024**, *10*, 305. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030305>

Academic Editors: Xinyang Yu and Long Li

Received: 28 February 2024

Revised: 19 March 2024

Accepted: 19 March 2024

Published: 21 March 2024



Copyright: © 2024 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

Water availability in the vineyard is a limiting factor for productivity in arid and semiarid zones and it is essential to improve water use efficiency [1,2]. Water availability in vineyards also affects sugar accumulation, and, with severe levels, it impairs wine quality [2,3]. The composition of the grapes for wine production depends on the water status of the vine during the growing season [4]. To adopt the most appropriate irrigation strategy for vines, it is essential to monitor the water status of the vines throughout the season [3,5,6]. Vegetative growth, yield, and berry composition are affected by the spatial heterogeneity of vineyards [7,8]. Water potential is the main indicator of vine water status, and some authors have established relationships between this indicator and berry compositional traits; however, these relationships differ between cultivars, regions, years, soil types, and management practices [3,9,10]. Furthermore, the results of a trial confirmed that unmanned aerial vehicles (UAVs) are a valuable tool for assessing spatial and temporal heterogeneity and monitoring vineyards with minimal operational cost [11]. The applications of thermal images with UAV in precision agriculture have been studied [12], demonstrating

the potential of UAV thermal measurements in different applications, including as a fast and practical way to assess and estimate crop water status or stress [13–15]. Concerning water stress, it has been found that thermal images show a correlation between minor changes in water stress that are undetectable using the normalized difference vegetation index (NDVI) [16]. The crop water stress index (CWSI) calculated from canopy temperature has been found to correlate with plant physiological indicators in certain cases [17–21]. Nevertheless, the large-scale use of CWSI as an indicator to trigger irrigation has not been widely adopted over a full season for several reasons, among which is that the correlation between CWSI and water potential may differ between crop stages and cultivars [22]. Research is needed to accurately assess these relationships. It is well known that even short-term water deficits affect growth processes and induce stomatal closure, which reduces transpiration and consequently evaporative cooling, increasing leaf temperature [23]. This makes it interesting to evaluate existing techniques to determine the influence of agronomic decisions on the water status of the vineyard.

It has been shown that the higher the amount of irrigation applied, the higher the efficiency when the frequency of irrigation is reduced, when measured with a lysimeter [24]. Concerning temperature, the effect of irrigation was studied concerning vineyards without irrigation for seven days, with an infrared thermal camera on a quad bike, showing differences of two degrees between irrigated and non-irrigated vines [25]. Water potential was also studied, showing trends indicating that higher irrigation frequency implies a loss of efficiency under conditions of low water availability [26], encouraging further research on this topic. Regarding water potential, it was shown that leaf water potential measurements in vineyards should be replaced as a general rule by stem or pre-dawn water potential readings, as leaf potential is much less discriminating than the other two, and only operational constraints restricting its implementation could justify its use. The study concluded that there is a certain preference towards mid-morning stem water potential [27]. Water status studies have also been carried out with mid-day stem water potential at different irrigation rates, showing a less stressed stem water potential when vines were irrigated with a higher amount ($0.50 \times \text{ET}_0$) compared to others that were irrigated with a lower amount ($0.25 \times \text{ET}_0$) [28]. Stem water potential studies have also been carried out at different dates and times without obtaining significant differences in the water potentials measured at 6:00, but obtaining significant differences at midday solar (12:00 h); obtaining less stressed water potentials with irrigations of $0.20 \times \text{ET}_0$ concerning dry irrigation; and less stressed water potentials with $0.40 \times \text{ET}_0$ concerning $0.20 \times \text{ET}_0$ [29]. In terms of comparative techniques, significant positive correlations of 0.81 have been found between temperature measurements taken from UAVs and from the ground [16]. Concerning UAV thermal camera measurements and water potential, negative significant correlation coefficients of -0.72 to -0.80 ($0.28 \times \text{ET}_0$ to $0.36 \times \text{ET}_0$) and -0.73 to -0.86 ($0.18 \times \text{ET}_0$ to $0.24 \times \text{ET}_0$) were found between leaf water potential between 14:00 and 17:00 and a ground-based FLIR thermal camera [30]. Significant negative correlations have also been found between stem water potential and thermal cameras on UAVs of -0.71 [16]. Although variations in the vapor pressure deficit can affect the cultivation temperature, it can also affect the temperature of the crop [21]. These significant correlation values suggest that canopy temperature measured on UAVs can be a simple and standardized indicator for rapid data collection over large areas of terrain [17], obtaining more representative surface data.

The influence of irrigation frequency and variety on production, vegetative development, and quality parameters has been investigated, obtaining little scope and little significant variation between frequencies, with different results depending on the vine variety and the year of cultivation, encouraging further research on this topic [31]. Nevertheless, no studies have been found that study irrigation frequency, pre-bud irrigation or shoot distribution with the above techniques. Taking this into account, we want to observe whether significant differences can be detected both with a thermal camera on a UAV and with mid-day stem water potential with different agronomic treatments, studying both

non-irrigated plants and plants irrigated every seven days ($0.30 \times ET_0$) in order to determine how to irrigate with the same quantities ($0.30 \times ET_0$) every 15 days and every 3 days. We also want to evaluate if irrigation before pea growth affects the opening or closing of shoots. The objective of this article is to analyze the effect of different agronomic treatments on the canopy temperature of the vineyard with a thermal camera in UAVs, to analyze the effect of different agronomic treatments on the water potential of the vineyard stem measured with a pressure chamber, and also to analyze advanced techniques for crop monitoring by comparing both techniques.

2. Materials and Methods

2.1. Description of the Experiment

The experiment was conducted during the 2022 growing seasons in a 1.2 hectares experimental vineyard of cv. Grenache (*Vitis vinifera* L.) grafted on 420A rootstock, located in Finca La Orden, Centre for Scientific and Technological Research of Extremadura (CICYTEX) in southwestern Spain. Regarding the beginning of the growing season, budbreak was on 21 March, flowering on 17 May, veraison on 26 July, and harvesting on 25 August. The climate of this location is semi-arid. The vines were 5 years old and trained as Royat bilateral cordons in a vertical trellis system. All vines were pruned in winter to eight spurs and two buds (16 buds per vine); in early spring, the number of shoots was manually adjusted to 16 per vine. The rows are oriented N–S and the distance between the rows and vines is 3.0 m and 1.4 m, respectively.

To obtain a wide range of possible water stress scenarios, seven different treatments were proposed and compared to a control treatment (T07). All of them have four replicates (blocks). The treatments differ as follows:

- T07, control treatment which consisted of applying 30% ET_0 from pea size with irrigation frequency every seven days. ET_0 was calculated from a meteorological station near (distance less than 1 km) to the test plot according to the Penman–Monteith method;
- T03, irrigation volume same as T07 but irrigation frequency every three days;
- T15, irrigation volume same as T07 but irrigation frequency is every fortnight;
- T7P, irrigation same as T07 in volume and frequency from pea size but with one irrigation up to field capacity before bud burst (March);
- T7A, irrigation same as T07 in volume and frequency from pea size, but with open canopy position (no vertical shoot-positioned);
- T7V, irrigation same as T07 in volume and frequency from pea size, but irrigation ceased in harvest (25th August);
- T00, rainfed treatment;
- T0P, rainfed treatment, but with one irrigation up to field capacity before bud burst (March).

2.2. Canopy Temperature Measurements

Thermal imaging was captured with a high-quality camera with radiometric correction suitable for a UAV using a DJI P4 drone with an integrated thermal camera, Vue Pro 640, 32 (FOV), 19 mm, 9 Hz. The thermal images were captured at solar noon (at the same time as the water status measurement with pressure chamber) with a ground sampling distance (GSD) of 3 cm/pixel; to achieve this GSD with the characteristics of the camera, images were taken at a flight altitude of 30 m and a pixel area of 10 cm². The interference of atmospheric conditions, camera movement (for blurred and out-of-focus images), and radiometric correction performed by the drone thermal camera was verified by measuring different control points (ground and plant) and calibration panels with different characteristics in the field with the apogee S411 thermometer. A calibration line was performed in the laboratory to verify the quality of the images obtained and the temperature values.

To process the thermal images obtained with the UAV, the PIX4D Mapper program was used. The thermal orthomosaic was processed using the QGIS 3.30.1 program to obtain the temperature values of the canopy zone in the different treatments. To obtain the specific

temperature of the canopy, the “vector”, “geoprocessing”, and “buffer” tools were selected. After this, the buffer parameters were configured, selecting a linear buffer with a distance on both sides of 0.5 m to obtain information for 1 m of canopy. Once the buffer was created, the attribute table of the buffer layer was opened, a new field was added, and the field statistics tool was used to calculate the average temperature within each buffer; for this, “vector”, “field statistics”, and “average” in the statistics group were selected and run for the buffer layer. Once a temperature per row was obtained, the data were passed to Excel to facilitate grouping and classification for subsequent statistical processing. Three measures were taken per block, with four blocks per treatment, with a total of eight treatments (T03, T07, T7A, T7V, T7P, T15, T00, and T0P).

2.3. Stem Water Potential

Stem water potential at midday was measured on the leaves of the shaded and lower side of the canopy close to the trunk. The leaves were wrapped in aluminum foil two hours before the time of measurement, with a pressure-chamber type Scholander (Soil Moisture Corp., Model 3500, Santa Barbara, CA, USA). The periodicity of the measurement was weekly, measuring one leaf per plant, in two plants per replicate (8 leaves per treatment).

Figure 1 shows the days on which the measurements were taken, as well as the different irrigation treatments. During the month in which the measurements were taken, there was no precipitation.

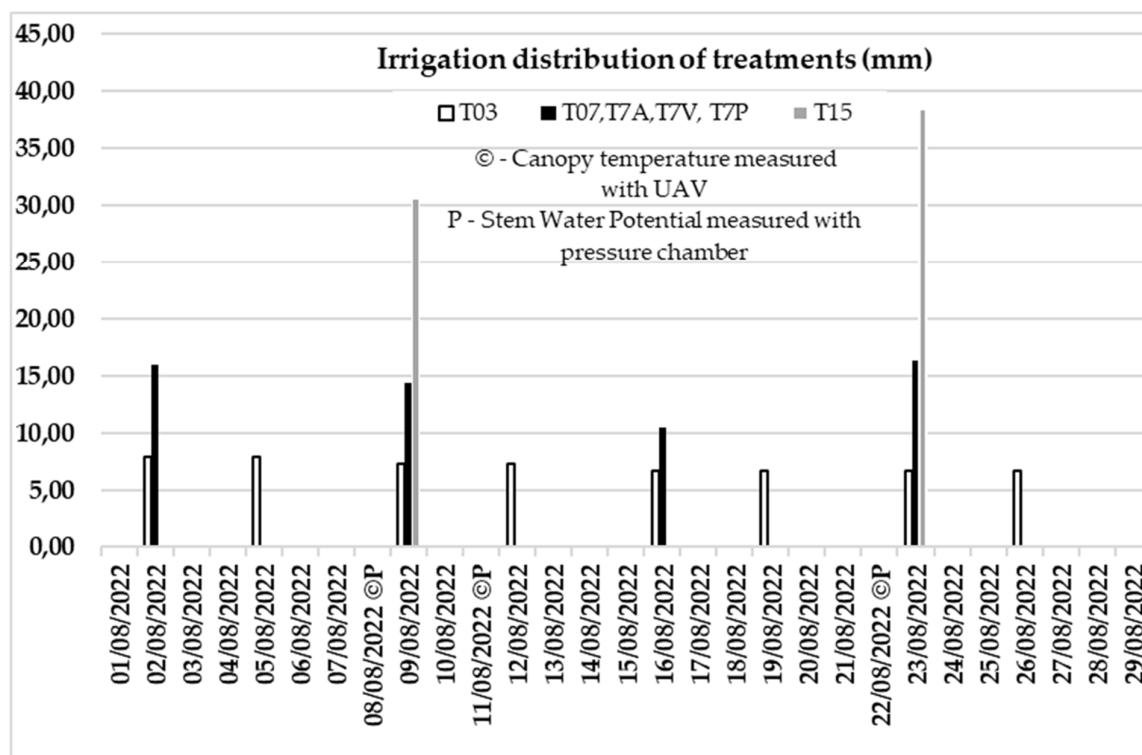


Figure 1. Distribution of irrigation frequency of the different treatments (T03, T07, T7A, T7V, T7P, T15) and days of measurement of canopy temperature with unmanned aerial vehicle (UAV) and stem water potential in the vineyard.

The measures were centralized in August, once the irrigation treatments were correctly established. The temperature measurements were made to coincide with the potential days to be able to compare them on three dates (F1, F2, and F3), which collected temperature and stem water potential information one day before a full fifteen-day irrigation cycle (F1, 8 August 2022), inside a complete fifteen-day irrigation cycle (F2, 11 August 2022) and at the end of a full fifteen-day watering cycle (F3, 22 August 2022).

2.4. Statistical Analysis

With the mean values obtained from the analyzed samples, a statistical study was carried out using the IBM SPSS Statistics 23.0 software for Windows 10 for the analysis of variance of repeated measures over time (ANOVA RM) (Tables 1 and 2), with a treatment factor with eight levels in four blocks for each treatment, measured on three different dates. In compliance with the previous assumptions, the significance of the interactions was analyzed; when the interaction was significant ($p < 0.05$), a post hoc test of comparison of means was carried out using the Tukey method. The results are shown as mean \pm standard deviation with the corresponding letter obtained from the post hoc test of comparison of means by the Tukey method. For the evaluation of the advanced technique for crop monitoring, a Pearson correlation analysis between temperature and water potential within each treatment (Table 3) was also performed with IBM SPSS Statistics 23.0, taking into account the data on the three dates and also a Pearson correlation analysis of all stem water temperature and potential values within each date (Table 4).

3. Results and Discussion

3.1. Canopy Temperature

Table 1 shows the results obtained for the canopy temperature measured in a vineyard by a thermal camera in a UAV. The highest level of significance is the temperature by date, so the results of the existing significance between different treatments and between different dates are shown. Therefore, a comparison is shown between all the irrigation treatments carried out, and between the three dates analyzed.

Table 1. Canopy temperature ($^{\circ}\text{C}$) measured in a vineyard by UAV on three dates (F1, F2 and F3). The values correspond to mean temperature \pm standard deviation.

Irrigation Treatment	F1		F2		F3	
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
T00	42.46 ^a	\pm 1.19	41.22 ^{ab}	\pm 0.75	38.15 ^{defg}	\pm 1.1
T0P	42.21 ^a	\pm 1.46	40.38 ^{abcd}	\pm 0.22	38.47 ^{cdef}	\pm 0.95
T03	41.33 ^{ab}	\pm 2.47	35.80 ^{fgh}	\pm 0.25	36.09 ^{fgh}	\pm 1.18
T7A	40.93 ^{abc}	\pm 1.36	36.30 ^{fgh}	\pm 0.07	36.61 ^{efgh}	\pm 0.53
T07	40.93 ^{abc}	\pm 1.97	36.20 ^{fgh}	\pm 0.68	36.51 ^{efgh}	\pm 0.98
T7V	41.45 ^{ab}	\pm 1.65	35.90 ^{fgh}	\pm 0.52	36.08 ^{fgh}	\pm 0.47
T7P	39.16 ^{bcde}	\pm 1.66	35.78 ^{gh}	\pm 0.65	36.15 ^{fgh}	\pm 1.17
T15	40.92 ^{abc}	\pm 1.43	34.57 ^h	\pm 0.69	36.88 ^{efgh}	\pm 0.97

^{a-h} Values with superscripts with different letters are significant ($p < 0.05$).

First, comparing the treatments within each date, it can be observed that, in F1, there are significant differences between T7P concerning the T00 and T0P rainfed treatments. In F2, there are significant differences between T00 and T0P with the rest of the treatments. In F3, no significant differences are shown between treatments.

Second, comparing the three different dates within each treatment, T00 showed significant differences between F1 and F2 with F3; T0P showed significant differences between F1 and F3; and the rest of the treatments to which some irrigation treatment was applied (T03, T7A, T07, T7V, T7P, T15) showed significant differences between F1 with F2 and F3.

Canopy temperature differences of more than two degrees have been observed in unirrigated vines for seven days compared to irrigated vineyards [25]. In the present study, this is true in F2 where there are also significant differences of more than 2 $^{\circ}\text{C}$ between vines with and without irrigation. In F1 this is also true, but only between vines without irrigation and the T7P irrigation treatment; the difference between the two treatments is the most pronounced when comparing rainfed treatments with irrigated treatments that, in addition to control irrigation, had irrigation before sprouting to reach field capacity. However,

when comparing irrigated vines with non-irrigated vines, no significant differences were found between vines watered every fifteen, seven, or three days, nor were there differences between vertically open or closed shoots.

When the frequency of irrigation is reduced, the greater the amount of irrigation applied according to needs, the greater the efficiency. Lower evaporation and greater transpiration [24,26] were obtained. Based on this, it can be assumed that higher transpiration leads to a lower canopy temperature. In this study, there were no significant differences between the frequencies of distribution of shoots when analyzing the thermal images, but significant differences were observed in F2 between treatments with irrigation and lower temperatures, and without irrigation, which had a higher temperature. This was also observed in F1, but only between rainfed conditions and higher temperatures, and T7P with lower temperatures.

Significant differences can be observed between rainfed and irrigated treatments; however, no significant differences are observed between different irrigation frequencies or distribution of shoots, which may also be influenced by the spatial variability of the plot. This implies the importance of properly setting up the measurement points and blocks, as was observed in a study in which water potential was measured remotely from thermal images, obtaining special variability between irrigation treatments [21]. No studies have been found that analyze irrigation frequencies or pre-bud irrigation, as well as shoot-like distributions in canopy temperature, but we have found in terms of vine wood productions or grape quality parameters depending on the frequency of irrigation and vineyard variety. Specifically, the variety analyzed in this cv. Grenache study obtained a slightly higher but not significant productive value in T07 than in T03 or T15, and slightly higher but not significant pruning wood values in T07 than in T03, and higher values than in T15. Regarding total soluble solids, there were no identified trends. Concerning pH, the wort did not offer a defined response, with little variation of values shown between the various treatments. Concerning total acidity, the greatest difference found was between T15, which was greater than T03 in one of the years without being significant. Concerning tartaric acid, the greatest difference observed was between T15 which was a year higher, and T03, which was lower without being significant. With regard to malic acid, the greatest numerical difference was between the T07 treatment, which was higher, and T15, which was lower without being significant. With regard to potassium concentrations, no significant trend was identified either. Finally, with regard to total polyphenols in cv. Grenache, the T15 treatment was higher, and T07 was lower, without maintaining a significant trend. However, the production and quality parameters analyzed were shown to have little scope and were not very significant, varying moderately according to the variety or year, which encourages further study in this line of research [31].

3.2. Stem Water Potential at Midday

Table 2 shows the results obtained with the pressure chamber for stem water potential at midday in a vineyard. Among the significances analyzed, the one with the highest level is that of the temperature by date; thus the results of the existing significance between different treatments and between different dates are shown. Therefore, a comparison is shown between all the irrigation treatments carried out and between the three dates analyzed.

Table 2. Stem water potential at midday (MPa) was measured in a vineyard with a pressure chamber on three dates (F1, F2, and F3). The values correspond to mean water potential ± standard deviation.

Irrigation Treatment	F1			F2			F3		
	Mean	±	Standard Deviation	Mean	±	Standard Deviation	Mean	±	Standard Deviation
T00	−1.80 ^a	±	0.10	−1.82 ^a	±	0.10	−1.93 ^a	±	0.16
TOP	−1.85 ^a	±	0.06	−1.78 ^a	±	0.07	−1.86 ^a	±	0.19
T03	−1.42 ^b	±	0.11	−1.42 ^b	±	0.14	−1.34 ^{bc}	±	0.09

Table 2. Cont.

Irrigation Treatment	F1		F2		F3	
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
T7A	−1.37 ^b	± 0.14	−1.33 ^{bc}	± 0.15	−1.23 ^{bc}	± 0.04
T07	−1.26 ^{bc}	± 0.27	−1.31 ^{bc}	± 0.15	−1.23 ^{bc}	± 0.09
T7V	−1.36 ^{bc}	± 0.15	−1.21 ^{bc}	± 0.18	−1.30 ^{bc}	± 0.06
T7P	−1.29 ^{bc}	± 0.32	−1.21 ^{bc}	± 0.08	−1.24 ^{bc}	± 0.17
T15	−1.40 ^b	± 0.16	−1.04 ^c	± 0.16	−1.32 ^{bc}	± 0.16

^{a-c} Values with superscripts with different letters are significant ($p < 0.05$).

First, comparing the different treatments within each date, F1 and F3 only show significant differences between the T00 and T0P rainfed treatments concerning the treatments that apply irrigation (T03, T7A, T07, T7V, T7P, T15). In F2, there are also significant differences between T00 and T0P and the rest of the treatments, but there are also significant differences between T3 and T15, in which the water potential was more negative and therefore the plants were more stressed in T3 than in T15.

Second, comparing the three different dates within each treatment, the only significant differences were shown between F1 and F2 at T15; in the rest of the treatments no significant differences were shown between the dates.

No studies have been found that analyze the water potential of the stem as a function of the frequency of irrigation in vineyards. The mid-day leaf water potential was studied, but no significant differences were found between irrigation frequencies of once a week and once every two weeks [21]. As mentioned above, when the frequency of irrigation is reduced and a greater amount of irrigation is applied according to needs, the efficiency is greater and lower evaporation and greater transpiration rates are obtained [24,26]. Given this, a plant that is not watered should present greater stress than a watered one. In addition, a plant that is watered with a lower frequency of watering and with a greater amount of water should present a lower stress. When stress through water potential is analyzed in this study, the above hypotheses are true in F1, F2, and F3 because the non-irrigated treatment always presented a more negative and significant water potential than the irrigated treatments. In addition, in F2 it was also true that at a lower frequency and higher amount of watering at T15, a lower stress and a less negative potential significantly than at a higher frequency with a lower amount of watering at T3. With respect to the amount of irrigation, it was observed that when a greater amount of irrigation, within the needs of the area, was applied, a better water status was achieved [28]. In the present study, a better water status was also observed among areas that were irrigated concerning and not irrigated on all dates. When evaluating a specific day of the irrigation period in F2, the plants that had a higher daily dose in T15 presented a better water status and significantly less negative potential, than those in T3 when a lower daily dose was applied. These results also correspond to studies of the stem water potential on different dates, where on three out of four dates there was a water potential in the most stressed stems with lower irrigation amounts [29]. In this trial, with stem water potential at midday, significant differences were found between rainfed treatments and easy irrigation and also, on one of the dates, between a higher and lower frequency of irrigation. No differences were observed between open or closed shoots or between pre-irrigation or control irrigation.

3.3. Evaluation of Advanced Technique for Crop Monitoring

The evaluation of the advanced crop monitoring technique showed that, first, according to the results shown in Tables 1 and 2 comparing both techniques within each date with the thermal camera, significant differences were shown between the T00 and T0P rainfed treatments in F1, but only with T7P and with stem water potential with pressure chamber between the T00 and T0P rainfed treatments with the other treatments that ap-

plied irrigation (T03, T7A, T07, T7V, T7P, T15). In F2 with the thermal camera, significant differences were identified between the T00 and T0P rainfed treatments and the rest of the treatments that applied irrigation (T03, T7A, T07, T7V, T7P, T15). With the stem water potential with the pressure chamber, a significant difference between T3 and T15 was also identified. In F3, no significant differences were identified between treatments with a thermal camera, and with stem water potential with pressure chamber, differences between the T00 and T0P rainfed treatments and the rest of the treatments (T03, T7A, T07, T7V, T7P, T15) were observed.

Comparing both techniques within each treatment, no significant differences between dates were noted in the pressure chamber measurements of stem water potential, except for T15, where significant differences between F1 and F2 were seen. In temperature measurements with the thermal camera for all treatments, differences between F1 and F2 and F3 were seen, except for the rainfed treatments, where T00 shows significant differences between F1 and F2 with F3. T0P showed significant differences between F1 and F3.

In addition to showing the comparison between the significant differences between Tables 1 and 2, for a better comparison analysis between the two techniques, Tables 3 and 4 show the results of the correlation analysis performed between the temperature values measured with a thermal camera on an UAV and water potential values measured with a pressure chamber camera.

Table 3. Pearson’s correlation coefficient (r) between canopy temperature measured with a thermal camera on a UAV and stem water potential measured at midday with a pressure chamber in the different irrigation treatments.

Treatment	Pearson Correlation Coefficient (r)
T3	−0.29 n.s.
T7	0.03 n.s.
T7A	−0.43 *
T7P	−0.41 *
T7V	−0.55 **
T15	−0.67 ***
T00	0.41 *
T0P	0.07 n.s.

n.s.—no sig. differences; *, **, ***—sig. differences at $p < 0.05$, 0.01 and 0.001, respectively.

As shown in Table 3, the treatments with a lower and higher frequency of irrigation (T7A, T7P, T7V, and T15) have a mean negative significant correlation. However, T7 and T3 did not present a significant correlation when analyzing each frequency separately with data from the three dates. For the rainfed treatments, T0P did not show a significant correlation and T00 showed a mean positive significant correlation.

Table 4. Pearson’s correlation coefficient (r) between canopy temperature measured with a thermal camera on an UAV and stem water potential measured at midday with a pressure chamber on three different measurement dates.

Date	Pearson Correlation Coefficient (r)
F1	−0.51 ***
F2	−0.88 ***
F3	−0.63 ***

*** sig. differences at $p < 0.001$.

The results of Table 4 show that on the three dates, taking into account all the treatments together within each date, the correlation between temperature measured with a

thermal camera on the UAV and the stem water potential at midday was between -0.51 and -0.88 , and was therefore significant, negative, and considerably strong.

The results between temperature and stem water potential of T7A, T7P, T7V, and T15 coincide with another rainfed study of the correlation between stem water potential at midday with a pressure chamber and temperature with a thermal camera on a UAV, in which a coefficient of determination of 0.50 was obtained and therefore a negative significant correlation coefficient of -0.71 . In this study, the same correlation coefficient of stem water potential with canopy temperature–ambient temperature was also shown, as well as with CWSI [16]. This may indicate that, even though variations in the vapor pressure deficit (VPD) of the air can affect the evaporative cooling of the canopy and thus the canopy temperature [21], the canopy temperature can be a quick and simple indicator of the water status of the plant, which could be obtained both airborne with UAVs, as well as with thermal camera from the ground, since coefficients of determination of 0.65 were found, indicating significant positive correlations of 0.81 between both techniques for obtaining the canopy temperature [16].

The results of T7A, T7P, T7V, and T15 also coincide with results seen in other studies. In this case, with the values of water potential of leaves measured between 14:00 and 17:00 h and the temperature from a terrestrial thermal camera showing that irrigation had been applied but that different frequencies were not present, with one of between 0.28 and 0.36 ET_o , a significant correlation coefficient of -0.72 to -0.80 was obtained. With an irrigation of 0.18 to 0.24 ET_o , a significant correlation coefficient between -0.73 to -0.86 was obtained [30]. The results also coincide with measured correlation results of remotely measured water potential with mid-day water potential, taking into account the optimal stage and time of measurement [21]. The results emphasize the value of canopy temperature as a relevant explanatory variable of the physiological state of the grapevine, despite being a simpler and more normalized thermal indicator [17].

4. Conclusions

The use of UAVs with thermal cameras to analyze the influence of different agronomic treatments in the canopy temperature did not allow for a differentiation of significant differences between irrigation frequencies, nor between vertically closed or open shoots. However, it did allow for differences between rainfed treatments and irrigation on one of the dates, and between rainfed and control irrigation treatments with a pre-irrigation before sprouting, to be observed.

The use of stem water potential measured at midday to analyze the influence on the different treatments agronomic studies did not make it possible to differentiate between vineyards with open or closed shoots. No differentiation between pre-irrigation treatments and controlled irrigation treatments was observed. However, it was possible to differentiate between rainfed treatments and irrigation treatments; to identify a difference in one of the dates between frequencies; and to find vineyards that were less stressed at a lower frequency with a greater amount of water in each irrigation.

Regarding the feasibility analysis of the advanced technique comparing the thermal camera information on the UAV and the stem water potential, the stem water potential technique has provided information according to what was expected, showing significant differences in the three dates between the rainfed and irrigated treatments. The technique was able to distinguish differences between frequencies. In the case of the thermal camera on the UAV, on one of the three dates (F2), the same differences were observed as those in the potential measurements between the rainfed and irrigated treatments. In F1, a difference was noted between the rainfed and one of the irrigation treatments; however, in F3, no significant differences were identified between the rainfed and irrigation treatments. Nevertheless, certain patterns were identified with the thermal camera on the UAV, and significant correlation values were found in the correlation data obtained. Therefore, the use of thermal cameras for the evaluation of plant water status is recommended, especially to obtain information in large areas quickly, as these can be measured more frequently.

Author Contributions: Conceptualization, G.E.-S., C.C., D.U. and F.J.M.; methodology, G.E.-S., C.C. and D.U.; software, C.C.; validation, D.U.; formal analysis, G.E.-S.; investigation, G.E.-S., C.C., D.U. and F.J.M.; resources, C.C. and D.U.; data curation, G.E.-S.; writing—original draft preparation G.E.-S.; writing—review and editing C.C., G.E.-S., D.U. and F.J.M.; visualization, G.E.-S., C.C., D.U. and F.J.M.; supervision, C.C., D.U. and F.J.M.; project administration, G.E.-S., C.C. and D.U.; funding acquisition, G.E.-S., C.C. and D.U. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Project PID2019-105039RR-C41/MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and AGROS 2022 project subsidized by the Regional Government of Extremadura co-financed by FEDER, and the Ministry of Universities of Spain for University Professor Formation (FPU20/07314).

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

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

References

1. Medrano, H.; Tomás, M.; Martorell, S.; Escalona, J.-M.; Pou, A.; Fuentes, S.; Flexas, J.; Bota, J. Improving Water Use Efficiency of Vineyards in Semi-Arid Regions. A Review. *Agron. Sustain. Dev.* **2015**, *35*, 499–517. [\[CrossRef\]](#)
2. Van Leeuwen, C.; Roby, J.; De Rességuier, L. Soil-Related Terroir Factors: A Review. *OENO One* **2018**, *52*, 173–188. [\[CrossRef\]](#)
3. Van Leeuwen, C.; Trégoat, O.; Choné, X.; Bois, B.; Pernet, D.; Gaudillère, J.-P. 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. Sci. Vigne Vin.* **2009**, *43*, 121–134. [\[CrossRef\]](#)
4. Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R. Response of Grapevine Cv. “Tempranillo” to Timing and Amount of Irrigation: Water Relations, Vine Growth, Yield and Berry and Wine Composition. *Irrig. Sci.* **2010**, *28*, 113–125. [\[CrossRef\]](#)
5. Girona, J.; Marsal, J.; Mata, M.; Del Campo, J.; Basile, B. Phenological Sensitivity of Berry Growth and Composition of Tempranillo Grapevines (*Vitis vinifera* L.) to Water Stress. *Aust. J. Grape Wine Res.* **2009**, *15*, 268–277. [\[CrossRef\]](#)
6. Basile, B.; Marsal, J.; Mata, M.; Vallverdú, X.; Bellvert, J.; Girona, J. Phenological Sensitivity of Cabernet Sauvignon to Water Stress: Vine Physiology and Berry Composition. *Am. J. Enol. Vitic.* **2011**, *62*, 452–461. [\[CrossRef\]](#)
7. Pastonchi, L.; Di Gennaro, S.F.; Toscano, P.; Matese, A. Comparison between Satellite and Ground Data with UAV-Based Information to Analyse Vineyard Spatio-Temporal Variability. *OENO One* **2020**, *54*, 919–934. [\[CrossRef\]](#)
8. Bellvert, J.; Marsal, J.; Mata, M.; Girona, J. Identifying Irrigation Zones across a 7.5-Ha ‘Pinot Noir’ Vineyard Based on the Variability of Vine Water Status and Multispectral Images. *Irrig. Sci.* **2012**, *30*, 499–509. [\[CrossRef\]](#)
9. Romero, P.; Fernández-Fernández, J.I.; Martínez-Cutillas, A. Physiological Thresholds for Efficient Regulated Deficit-Irrigation Management in Winegrapes Grown under Semiarid Conditions. *Am. J. Enol. Vitic.* **2010**, *61*, 300–312. [\[CrossRef\]](#)
10. Shellie, K.C.; Bowen, P. Isohydrodynamic Behavior in Deficit-Irrigated Cabernet Sauvignon and Malbec and Its Relationship between Yield and Berry Composition. *Irrig. Sci.* **2014**, *32*, 87–97. [\[CrossRef\]](#)
11. Atencia Payares, L.K.; Tarquis, A.M.; Hermoso Peralo, R.; Cano, J.; Cámara, J.; Nowack, J.; Gómez del Campo, M. Multispectral and Thermal Sensors Onboard UAVs for Heterogeneity in Merlot Vineyard Detection: Contribution to Zoning Maps. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 4024. [\[CrossRef\]](#)
12. Messina, G.; Modica, G. Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1491. [\[CrossRef\]](#)
13. Gago, J.; Douthe, C.; Coopman, R.E.; Gallego, P.P.; Ribas-Carbo, M.; Flexas, J.; Escalona, J.; Medrano, H. UAVs Challenge to Assess Water Stress for Sustainable Agriculture. *Agric. Water Manag.* **2015**, *153*, 9–19. [\[CrossRef\]](#)
14. Radoglou-Grammatikis, P.; Sarigiannidis, P.; Lagkas, T.; Moscholios, I. A Compilation of UAV Applications for Precision Agriculture. *Comput. Netw.* **2020**, *172*, 107148. [\[CrossRef\]](#)
15. Pádua, L.; Marques, P.; Adão, T.; Guimarães, N.; Sousa, A.; Peres, E.; Sousa, J.J. Vineyard Variability Analysis through UAV-Based Vigour Maps to Assess Climate Change Impacts. *Agronomy* **2019**, *9*, 581. [\[CrossRef\]](#)
16. Baluja, J.; Diago, M.P.; Balda, P.; Zorer, R.; Meggio, F.; Morales, F.; Tardaguila, J. Assessment of Vineyard Water Status Variability by Thermal and Multispectral Imagery Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Irrig. Sci.* **2012**, *30*, 511–522. [\[CrossRef\]](#)
17. García-Tejero, I.F.; Costa, J.M.; Egipto, R.; Durán-Zuazo, V.H.; Lima, R.S.N.; Lopes, C.M.; Chaves, M. Thermal Data to Monitor Crop-Water Status in Irrigated Mediterranean Viticulture. *Agric. Water Manag.* **2016**, *176*, 80–90. [\[CrossRef\]](#)
18. García-Tejero, I.F.; Rubio, A.E.; Viñuela, I.; Hernández, A.; Gutiérrez-Gordillo, S.; Rodríguez-Pleguezuelo, C.R.; Durán-Zuazo, V.H. Thermal Imaging at Plant Level to Assess the Crop-Water Status in Almond Trees (Cv. Guara) under Deficit Irrigation Strategies. *Agric. Water Manag.* **2018**, *208*, 176–186. [\[CrossRef\]](#)
19. Petrie, P.R.; Wang, Y.; Liu, S.; Lam, S.; Whitty, M.A.; Skewes, M.A. The Accuracy and Utility of a Low Cost Thermal Camera and Smartphone-Based System to Assess Grapevine Water Status. *Biosyst. Eng.* **2019**, *179*, 126–139. [\[CrossRef\]](#)
20. Pou, A.; Diago, M.P.; Medrano, H.; Baluja, J.; Tardaguila, J. Validation of Thermal Indices for Water Status Identification in Grapevine. *Agric. Water Manag.* **2014**, *134*, 60–72. [\[CrossRef\]](#)

21. Bellvert, J.; Zarco-Tejada, P.J.; Marsal, J.; Girona, J.; González-Dugo, V.; Fereres, E. Vineyard Irrigation Scheduling Based on Airborne Thermal Imagery and Water Potential Thresholds. *Aust. J. Grape Wine Res.* **2016**, *22*, 307–315. [[CrossRef](#)]
22. Bellvert, J.; Marsal, J.; Girona, J.; Zarco-Tejada, P.J. Seasonal Evolution of Crop Water Stress Index in Grapevine Varieties Determined with High-Resolution Remote Sensing Thermal Imagery (Revisión Bibliográfica). *Irrig. Sci.* **2015**, *33*, 81–93. [[CrossRef](#)]
23. Santesteban, L.G.; Di Gennaro, S.F.; Herrero-Langreo, A.; Miranda, C.; Royo, J.B.; Matese, A. High-Resolution UAV-Based Thermal Imaging to Estimate the Instantaneous and Seasonal Variability of Plant Water Status within a Vineyard. *Agric. Water Manag.* **2017**, *183*, 49–59. [[CrossRef](#)]
24. Montoro, A.; Mañas, F.; López-Urrea, R. Transpiration and Evaporation of Grapevine, Two Components Related to Irrigation Strategy. *Agric. Water Manag.* **2016**, *177*, 193–200. [[CrossRef](#)]
25. Loveys, B.R.; Jones, H.G.; Theobald, J.C.; McCarthy, M.G. An Assessment of Plant-Based Measures of Grapevine Performance as Irrigation Scheduling Tools. *Acta Hort.* **2008**, *792*, 421–427. [[CrossRef](#)]
26. Sebastián, B.; Baeza, P.; Santesteban, L.G.; Sánchez de Miguel, P.; De La Fuente, M.; Lissarrague, J.R. Response of Grapevine Cv. Syrah to Irrigation Frequency and Water Distribution Pattern in a Clay Soil. *Agric. Water Manag.* **2015**, *148*, 269–279. [[CrossRef](#)]
27. Santesteban, L.G.; Miranda, C.; Marín, D.; Sesma, B.; Intrigliolo, D.S.; Mirás-Avalos, J.M.; Royo, J.B. 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.* **2019**, *221*, 202–210. [[CrossRef](#)]
28. Uriarte Hernández, D.; Moreno Cardona, D.; Prieto Losada, M.H.; Valdés Sánchez, E.; Rubio Cano, J.A.; Yuste Bombín, J. Study of Different Deficit Irrigation (Conventional and PRD [Partial Root Drying]) in Cv. Tempranillo in Extremadura (Spain). Effect on the Productive and Vegetative Aspects and on the Berry Composition. In Proceedings of the Congreso Mundial de la Viña y el Vino, 29, Logroño, España, 25–30 June 2006; Viticultura Enología Profesional: Logroño, Spain, 2006. 106.
29. Yuste, J.; Gutiérrez, I.; Rubio, J.; del Valle Alburquerque, M. Leaf and Stem Water Potential as Vine Water Status Indicators, in Tempranillo Grapevine, under Different Water Regimes in the Duero Valley. *J. Int. Sci. Vigne Vin.* **2004**, *38*, 21–26. [[CrossRef](#)]
30. Costa, J.M.; Egipto, R.; Sánchez-Virosta, A.; Lopes, C.M.; Chaves, M.M. Canopy and Soil Thermal Patterns to Support Water and Heat Stress Management in Vineyards. *Agric. Water Manag.* **2019**, *216*, 484–496. [[CrossRef](#)]
31. Yuste, J.; Montoro, A.; Cancela, J.J.; Martínez-Porro, D.; Mancha, L.A.; Moreno, D.; Torija, I.; Rodríguez-Febreiro, M.; Vilanova, M.; Uriarte, D. Frecuencia de Riego En Variedades Tintas: Repercusión En La Producción y La Composición de La Uva, Durante Un Periodo Bienal, En 4 Regiones de España. *BIO Web Conf.* **2023**, *68*, 01004. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Capítulo 6. Discusión general.

El agua es un recurso vital para la agricultura en general y en particular para la viticultura. El uso de agua se encuentra sometido a una creciente presión debido al aumento de la demanda global, el cambio climático y la competencia por este recurso.

La agricultura, que consume una gran parte del agua dulce disponible, depende en gran medida de la gestión eficiente de este recurso esencial. En el caso del viñedo, un riego eficiente es esencial para asegurar la calidad y la cantidad de producción. Sin embargo, la escasez de agua y la variabilidad climática obliga a adoptar prácticas de riego innovadoras y sostenibles que reduzcan el consumo de agua sin comprometer a la productividad y calidad.

La implementación de diferentes tecnologías actuales permite optimizar el uso de agua adaptándose a las necesidades específicas de cada viñedo y contribuyendo a una viticultura que sea resiliente, rentable y sostenible.

Es por esto por lo que el eje seguido en esta tesis es analizar la viabilidad de distintas tecnologías en la evaluación del efecto de diferentes estrategias agronómicas, para llevar a cabo un riego inteligente. Para ello se plantean las siguientes cuestiones:

- ¿Se puede utilizar un modelo de simulación para proporcionar información útil sobre uso eficiente del agua?

- ¿Los sensores que se usan en la actualidad pueden proporcionar información complementaria a un modelo de simulación para ayudar en la toma de decisiones agronómicas en general y de riego en particular?

- ¿Ajustar la puesta en marcha del modelo con medidas de estos sensores permite evaluar de una manera real la eficiencia del uso de agua, evitando pérdidas por evaporación y ayudando a tomar decisiones, por ejemplo, en cuanto a la frecuencia de riego?

- ¿Permiten las medidas de campo con diferentes sensores medir o monitorizar las diferencias entre diferentes estrategias agronómicas, como pueden ser regar o no regar, con qué frecuencia regar o si la distribución de los pámpanos afecta?

Para responder a estas cuestiones, en el **Capítulo 3** de esta tesis doctoral se muestra cómo se puede utilizar un modelo de simulación SIMDualKc [86,87,167], para poder simular la evapotranspiración por separado, de tal forma que se pueden ver en el caso de viñedo, como diferentes estrategias agronómicas afectan a las pérdidas de agua por evaporación y a

tener una mayor o menor transpiración. La puesta en marcha del modelo de simulación SIMDualKc para viñedo es eficaz, sin embargo, cuando se introduce la fracción húmeda de suelo en el caso de diferentes cantidades y frecuencias de riego, el modelo por defecto introduce 0,4 (40%) cuando se selecciona riego por goteo, debido a que es la cantidad observada en la calibración del modelo, lo cual permite observar que no tiene en cuenta esta variación de bulbo húmedo para diferentes frecuencias y cantidades de riego si selecciona por defecto. Es por esto por lo que en este capítulo se presenta un sensor TDR que permite medir la humedad de suelo junto a una plantilla creada para poder evaluar la fracción húmeda de diferentes frecuencias y cantidades de riego. Además, en este capítulo se muestra como diferentes sensores pueden ayudar a comparar la eficacia del modelo SIMDualKc con el bulbo húmedo ajustado, como puede ser los sensores de conductancia estomática o las medidas de producción para evaluar el rendimiento. Para finalizar este capítulo se presentan como es posible utilizar en viñedo sensores como medidores de presión para evaluar el potencial hídrico y cámara térmica en UAV o dron, para evaluar cómo afectan diferentes decisiones agronómicas de riego o distribución de pámpanos, a parámetros de potencial hídrico o temperatura.

Una vez visto la posibilidad de utilizar estas nuevas tecnologías en viñedo de forma complementaria, en el **Capítulo 4** de esta tesis doctoral se evalúa el ajuste con sensor TDR del bulbo húmedo según diferentes frecuencias de riego para aplicar un riego de $0,30 \times ET_0$ (riego cada 3 días (T03), riego cada 7 días (T07) y riego cada 15 días (T15) con la misma cantidad de riego aplicada total y, por lo tanto, distintas cantidades proporcionales aplicadas en cada evento de riego) y si este ajuste muestra diferencias en evaporación y transpiración entre tratamientos de frecuencias, simuladas con el modelo SIMDualKc introduciendo datos reales de cultivo, riego, clima y suelo, y comparar esta información con datos de sensores de campo de conductancia, así como evaluar el efecto en la producción. El impacto de la frecuencia de riego en la fracción húmeda fue significativo, con mayor fracción humedecida para cantidad de agua mayores y frecuencia de riego menores. T15 ($fw = 0,665$) obtuvo mayor fracción húmeda que T7 ($fw = 0,424$), y este, mayor que T3 ($fw = 0,127$), coincidiendo con lo estudiado en otras investigaciones, a mayor cantidad de agua, mayor fracción húmeda [73,169,170], lo que hace demostrar que el ajuste con TDR, es una técnica fiable, coincidiendo con otras investigaciones [91,92]. Una vez realizado este ajuste, introduciendo estos datos en la fw del modelo y cambiando el 0,4 (40%) que establece por defecto el modelo cuando se selecciona riego por goteo [87], se evalúa la evaporación y transpiración de los diferentes tratamientos. Los valores simulados de evaporación, como porcentaje de ET_c , se encontraban dentro del rango encontrados en otros estudios [88,134,135,154,155,157], el

tratamiento de riego T07 fue el menos favorable en cuanto a evaporación (44,248%) en comparación que T15 (38,627%) y T03 (30,703%). La diferencia entre T07 y T15 coincide con algunos estudios previos en viñedo, en los que se obtuvieron resultados más eficientes, con frecuencias más bajas [77], en este capítulo también se obtuvo una eficiencia positiva en términos de evaporación con T03 en comparación con resto de tratamientos, lo que puede deberse a que pequeños intervalos sin causar encharcamiento también puede hacer que el agua esté disponible de manera eficiente para las raíces, como se observa en algún estudio previo [76]. En cuanto a transpiración, se obtuvieron los mismos patrones que para evaporación, con el caso más desfavorable para T07, con menor transpiración que T03 y T15. Comparando estos resultados con medidas de campo de conductancia estomática, se obtiene la misma tendencia en cuanto a T07 peores resultados que T15 y T03, sin embargo, no se muestra una tendencia clara entre T03 y T15. Sin embargo, las diferencias entre las frecuencias de riego obtenidas en el modelo de simulación SIMDualKc, no se manifiestan en el rendimiento. Esto puede deberse a que uno de los factores que puede afectar en gran medida es la cantidad aplicada de riego, como se ha demostrado en alguna investigación de comparación de frecuencia en riego, donde la frecuencia afectaba según si se aplicaba una cantidad de riego determinada ($0,2xET_0$) pero no afectaba si la cantidad de riego era mayor ($0,4xET_0$) [81]. Los sensores y modelo utilizados en esta investigación permitieron de una manera satisfactoria ajustar el bulbo húmedo del modelo de simulación y calcular la evaporación y transpiración de los diferentes tratamientos, sin embargo, se corrobora que la interacción entre factores climáticos, suelos, variedades, cultivos, tipos de riego en términos de frecuencia y cantidad y estrategias agronómicas hace difícil predecir o comparar resultados, coincidiendo esta variabilidad en la interacción de estos factores con otras investigaciones [23,71,75]. Sin embargo, es una información importante, invitando a los investigadores a seguir investigando en esta línea para evaluar diferentes condicionantes locales.

Para evaluar cómo afectan estos condicionantes en condiciones semiáridas del suroeste de España, en el **Capítulo 5** de esta tesis doctoral, se evalúa la capacidad de sensores en viña (vehículo aéreo no tripulado o dron con cámara térmica incorporada y cámara de presión Scholander para potencial hídrico de tallo a medio día) para monitorizar diferentes tratamientos agronómicos. El tratamiento control consistió en aplicar un $0,30xET_0$ desde el tamaño de guisante con una frecuencia de un riego cada 7 días (T07), el resto de los tratamientos fue, mismo volumen que tratamiento control pero frecuencia de riego cada 3 días (T03), mismo volumen que tratamiento control pero frecuencia de riego cada 15 días (T15), riego igual que tratamiento control en volumen y frecuencia a partir de tamaño guisante

pero con un riego extra hasta capacidad de campo antes de brotación (T7P), riego igual que tratamiento control en volumen y frecuencia, pero con una posición de dosel abierta (sin brotes verticales) (T7A), riego igual que tratamiento control en volumen y frecuencia pero el riego cesa en la cosecha (T7V), tratamiento sin riego (T00), tratamiento sin riego desde brotación, pero con un riego hasta capacidad de campo antes de brotación (T0P). Las medias se tomaron durante tres fechas (F1, F2, F3). El uso de vehículo aéreo no tripulado o dron con cámara térmica no encontró diferencias significativas entre frecuencias de riego, ni entre brotes verticales o abiertos, sin embargo, si permitió observar diferencias significativas entre los tratamientos de secano y riego en una de las fechas y entre los tratamientos de secano y riego control con un riego antes de la brotación en otra fecha. En una investigación anterior se encontraron diferencias de más de 2 grados entre viñedos regados y de secano [171], esto coincide con este estudio en F2 y en F1 entre secanos y T7P. En otros estudios previos [77,81], cuando se redujo la frecuencia de riego, se obtuvo una menor evaporación y mayor transpiración con una cantidad determinada de riego, en base a esto una mayor transpiración puede conducir a una temperatura de dosel más baja, sin embargo, en este estudio, midiendo la temperatura de dosel con dron, solo se manifiesta esa diferencia entre secanos y riego en F2 y entre secanos y T7P en F1. Estas no diferencias entre frecuencias de riego pueden ser explicadas debido a la variedad espacial en el cultivo [114], y la interferencia de factores como variedad, clima, suelo o cultivos [75]. En cuanto a los resultados de potencial hídrico de tallo a mediodía, no se encontró diferencias significativas entre viñedos con brotes verticales o abiertos, tampoco diferencias significativas entre tratamientos con riego extra y riego como tratamiento control, sin embargo, se encontró diferencia entre tratamiento de secano y riego en todas las fechas y, en una de las fechas (F2), se encontró una diferencia significativa entre T03 y T15 con un mayor estrés en T03. No se encontraron estudios que analicen el potencial hídrico de tallo a medio día según la frecuencia de riego. Se estudió el potencial hídrico de hoja a medio día, sin encontrarse diferencias significativas entre frecuencias [114]. En otra investigación, reduciendo la frecuencia y aumentando la cantidad en cada evento, se redujo la evaporación y aumentó la transpiración con una cantidad determinada de riego [77,81], ante esto una planta que no se riega debería presentar un mayor estrés que una que no se riega, esto se cumple en las tres fechas en este estudio midiendo potenciales, y una planta que se riega con mayor cantidad y menor frecuencia debería tener menor estrés, esto se cumple en la F2 midiendo con potenciales. Correlacionando los resultados de ambas técnicas, se encontraron ciertos patrones de correlación dentro algunos tratamientos con riego (T7A, T7P, T7V y T15), sin mostrar correlaciones eficaces a la hora de diferenciar en el resto de los tratamientos. Sin embargo, al tener en cuenta todos los datos de temperatura y todos los datos de potenciales, sin diferenciar entre tratamientos, la correlación es fuerte en

las tres fechas de medida. Las correlaciones encontradas, coinciden con otros estudios mostrando también correlaciones entre potencial hídrico de tallo al mediodía con cámara de presión y la temperatura con una cámara térmica en dron, pero en seco, esto hace indicar que la temperatura de dosel puede ser un indicador rápido y sencillo de estado hídrico [112]. También las correlaciones coinciden con otro estudio en el que se correlacionó las medidas de potencial hídrico, en este caso de hoja y temperatura en este caso con cámara térmica desde el suelo, con riego, pero sin diferenciar entre frecuencias [113]. Los resultados destacan el valor de la temperatura de copa como variable explicativa relevante del estado fisiológico de la vid [115]. Esto hace que puedan ser medidas complementarias, dependiendo sobre todo del número de medidas a tomar, siendo el potencial hídrico adecuado como muestra puntual para obtener muestras exactas de superficies menos representativas y la cámara térmica para obtener datos de superficies más extensas. Animando a seguir investigando en esta línea debido a que puede variar mucho en función de interacciones de diversos factores como localización, variedad, clima, suelo o cultivo. Pero se considera importante que los profesionales tengan a disposición esta información sobre como es el uso de estas tecnologías para poder aplicar estas técnicas y poder realizar una agricultura más eficiente.

Capítulo 7. Conclusiones.

Para finalizar este trabajo se extraen las siguientes conclusiones:

- La selección del modelo SIMDualKc ha permitido adaptar correctamente este modelo al cultivo del viñedo, identificando que cuando se seleccionaba el riego por goteo, no se modificaba la fracción humedecida de suelo, independientemente de la cantidad y frecuencia de riego, debido a que es la fracción húmeda que se observó en la creación del modelo y abriendo una posibilidad de ajuste de este modelo con una fracción húmeda de campo real.
- Para este ajuste ha sido eficaz el sensor FieldScout TDR 350 junto a una plantilla de elaboración propia, permitiendo conocer el bulbo húmedo real de cada tratamiento de riego.
- Sensores como cámara de presión Scholander para medida de potencial hídrico y porómetro foliar Decagon SC-1 para medida de conductancia estomática permitieron ajustar y comparar correctamente los resultados obtenidos en la simulación con el modelo SIMDualKc.
- La utilización de una cámara térmica integrada en un vehículo aéreo no tripulado o dron junto a la cámara de presión tipo Scholander para evaluar el potencial hídrico, permitió de manera eficiente registrar datos de la parcela experimental para analizar el efecto de las estrategias agronómicas.
- La fracción humedecida del modelo fue ajustada, modificando el valor por defecto que proporcionaba el modelo e introduciendo, el valor exacto de fracción húmeda observada en campo, que fue mayor cuanto menor era la frecuencia y mayor era la cantidad aplicada de cada riego.
- Con la fracción húmeda ajustada se observaron pérdidas de evaporación según el modelo SIMDualKc, el tratamiento con mayores pérdidas fue T07, seguido de T15 y T03, encontrándose todas dentro del intervalo de evaporaciones encontradas en investigaciones previas.
- En cuanto a la transpiración obtenida con el modelo SIMDualKc, el tratamiento con menor transpiración fue T07, seguido de T15 y T03, coincidiendo con las medidas de conductancia estomática, presentando el caso más desfavorable para T07 y, sin embargo, sin mostrar una clara diferencia entre T03 y T15.
- Las diferencias encontradas entre evaporación y transpiración no se manifiestan en el rendimiento, sin encontrar diferencias significativas en la producción entre las diferentes frecuencias de riego.

- Los resultados de esta investigación junto a investigaciones previas no demuestran una clara tendencia en cómo afecta la frecuencia de riego, mostrando gran variabilidad según la variedad de cultivo, las condiciones climatológicas, tipo de suelo o diferentes estrategias de riego en cuanto a cantidad y frecuencia, animando a conocer las condiciones locales de cada parcela.
- Para conocer las condiciones locales de cada parcela, son válidos sensores como cámara térmica en vehículo aéreo no tripulado o dron o cámaras de presión tipo Scholander para potencial hídrico.
- La cámara térmica encontró diferencias entre tratamientos de riego y sin riego en una fecha y entre tratamientos sin riego y tratamiento control con un riego antes de brotación en otra fecha, sin diferenciar entre el resto de los tratamientos.
- La cámara de presión tipo Scholander encontró diferencias entre tratamientos con y sin riego en todas las fechas, encontrando en una de las fechas diferencias entre una frecuencia alta (T03) más estresada, que con una frecuencia baja menos estresada (T15).
- En cuanto a la comparativa entre la información recogida por la cámara térmica y cámara de presión tipo Scholander se identifican varias correlaciones significativas, esto hace que puedan ser medidas complementarias, dependiendo sobre todo del número de medidas a tomar, siendo el potencial hídrico adecuado como muestra puntual para obtener muestras exactas de superficies menos representativas y la cámara térmica para obtener datos de superficies más extensas.
- Debido a que los resultados pueden ser muy variables dependiendo de factores como localización, variedad de cultivo, datos de suelo o de clima, el modelo de simulación, así como los diferentes sensores utilizados en esta investigación, se consideran tecnologías viables para evaluar el efecto de diferentes decisiones agronómicas, para llevar a cabo medidas inteligentes, rentables y sostenibles.

Capítulo 8. Referencias bibliográficas.

1. Naciones Unidas. Datos Globales Naciones Unidas. Available online: <https://www.un.org/es/global-issues/population> (accessed on 1 August 2024).
2. Grupo Banco Mundial. Datos Globales Grupo Banco Mundial. Available online: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?view=chart> (accessed on 1 August 2024).
3. Sánchez Sánchez, E.; Rodríguez Fonseca, B.; Bladé, I.; Brunet, M.; Aznar Lecocq, R.; Cacho, I.; Casado Calle, M.J.; Gimeno, L.; Gutiérrez Llorente, J.M.; Pérez Jordán, G. *Progress in Detection and Projection of Climate Change in Spain since the 2010 CLIVAR-Spain Regional Climate Change Assessment Report*; International CLIVAR Project Office. **2017**, url: <https://www.un.org/es/global-issues/population>
4. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Informe Sobre Estado Climático España. Available online: https://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/informe_estado_clima (accessed on 1 August 2024).
5. Diario Oficial de Extremadura. Consejería de Hacienda y Administración Pública. Resolución de 21 de Noviembre de 2022, de La Secretaría General, Por La Que Se Da Publicidad al Convenio de Colaboración Entre La Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Población y Territorio de La Junta de Extremadura y La Comunidad de Regantes “Tierra de Barros” Para La Transformación En Regadío En La Zona Regable de Tierra de Barros (Badajoz). Available online: <https://doe.juntaex.es/otrosFormatos/html.php?xml=2022063627&anio=2022&doe=2360o> (accessed on 1 August 2024).
6. Statista. Ranking de Los Países Con Mayor Superficie Dedicada a Viñedos a Nivel Mundial En 2023. Available online: <https://es.statista.com/estadisticas/1292508/superficie-mundial-de-vinedos-por-pais/> (accessed on 1 August 2024).
7. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. *Informe Anual de Indicadores. Agricultura, Pesca y Alimentación. 2023*, url: https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/indicadores_2022_roboto_web_baja_resolucion_tcm30-666558.pdf
8. Federación Española del Vino. El Sector En Cifras. Available online: <https://www.fev.es/sector-cifras/> (accessed on 1 August 2024).

9. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Encuesta Sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). Encuesta de Marco de Áreas de España. Available online: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/> (accessed on 1 August 2024).
10. AEMET. Ministerio de España para la transición ecológica y el reto demográfico. Balance Climático Del Pasado Año. Available online: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2024/enero/2023--un-ano-extremadamente-calido-y-muy-seco.html> (accessed on 1 August 2024).
11. Mirás-Avalos, J.; Araujo, E. Optimization of Vineyard Water Management: Challenges, Strategies, and Perspectives. *Water (Basel)*. **2021**, *13*, 746, doi:10.3390/w13060746.
12. Medrano, H.; Tomás, M.; Martorell, S.; Escalona, J.-M.; Pou, A.; Fuentes, S.; Flexas, J.; Bota, J. Improving Water Use Efficiency of Vineyards in Semi-Arid Regions. A Review. *Agron Sustain Dev*. **2015**, *35*, 499–517, doi:10.1007/s13593-014-0280-z.
13. Van Leeuwen, C.; Roby, J.; De Rességuier, L. Soil-Related Terroir Factors: A Review. *Oeno One*. **2018**, *52*, 173–188, doi:10.20870/oenone.2018.52.2.2208.
14. Van Leeuwen, C.; Trégoat, O.; Choné, X.; Bois, B.; Pernet, D.; Gaudillère, J.-P. 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. Sci. Vigne Vin*. **2009**, *43*, 121–134, doi:10.20870/oenone.2009.43.3.798.
15. Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R. Response of Grapevine Cv. “Tempranillo” to Timing and Amount of Irrigation: Water Relations, Vine Growth, Yield and Berry and Wine Composition. *Irrig Sci*. **2010**, *28*, 113–125, doi:10.1007/s00271-009-0164-1.
16. Girona, J.; Marsal, J.; Mata, M.; Del Campo, J.; Basile, B. Phenological Sensitivity of Berry Growth and Composition of Tempranillo Grapevines (*Vitis Vinifera* L.) to Water Stress. *Aust J Grape Wine Res*. **2009**, *15*, 268–277, doi:10.1111/j.1755-0238.2009.00059.x.
17. Basile, B.; Marsal, J.; Mata, M.; Vallverdú, X.; Bellvert, J.; Girona, J. Phenological Sensitivity of Cabernet Sauvignon to Water Stress: Vine Physiology and Berry Composition. *Am J Enol Vitic*. **2011**, *62*, 452–461, doi:10.5344/ajev.2011.11003.

18. Pastonchi, L.; Di Gennaro, S.F.; Toscano, P.; Matese, A. Comparison between Satellite and Ground Data with UAV-Based Information to Analyse Vineyard Spatio-Temporal Variability. *OENO One*. **2020**, *54*, 919–934, doi:10.20870/oenone.2020.54.4.4028.
19. Bellvert, J.; Marsal, J.; Mata, M.; Girona, J. Identifying Irrigation Zones across a 7.5-Ha 'Pinot Noir' Vineyard Based on the Variability of Vine Water Status and Multispectral Images. *Irrig Sci*. **2012**, *30*, 499–509, doi:10.1007/s00271-012-0380-y.
20. Uriarte Hernández, D.; Mancha Ramírez, L.A.; Gómez Román, O.; Prieto Losada, M. del H. Manual Práctico de Riego Vid Para Vinificación de Cicytex. Available online: https://cicytex.juntaex.es/documents/46972/70576/RIEGO_VID-.pdf/2006013e-4356-4272-8e8e-142b1dcdfeb0 (accessed on 2 August 2024).
21. Ministerio de Agricultura, P. y A. del G. de España. Consultas de Datos Meteorológicos Sistema de Información Agroclimática Para El Regadío. Available online: <https://servicio.mapa.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1> (accessed on 2 August 2024).
22. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO *Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO. **1998**, *300*, D05109, url: <https://www.researchgate.net/publication/235704197>
23. 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, doi:10.1016/j.agwat.2020.106645.
24. Escalona, J.M.; Flexas, J.; Medrano, H. Stomatal and Non-Stomatal Limitations of Photosynthesis under Water Stress in Field-Grown Grapevines. *Functional Plant Biology*. **1999**, *26*, 421–433.
25. Medrano, H.; Escalona, J.M.; Flexas, J. *Indicadores Fisiológicos Para El Control Del Estado Hídrico de La Vid*. **2007**. ISBN 978-84-85441-86-0.
26. Lavoie-Lamoureux, A.; Sacco, D.; Risse, P.; Lovisolo, C. Factors Influencing Stomatal Conductance in Response to Water Availability in Grapevine: A Meta-analysis. *Physiol Plant*. **2017**, *159*, 468–482, doi:10.1111/ppl.12530.
27. Chaves, M.M.; Zarrouk, O.; Francisco, R.; Costa, J.M.; Santos, T.; Regalado, A.P.; Rodrigues, M.L.; Lopes, C.M. Grapevine under Deficit Irrigation: Hints from

- Physiological and Molecular Data. *Ann Bot.* **2010**, *105*, 661–676, doi:10.1093/aob/mcq030.
28. Diakou-Verdin, P.; Carde, J.-P.; Gaudillère, J.-P.; Barrieu, F.; Ollat, N.; Moing, A. Grape Berry Development: A Review. *OENO One.* **2002**, *36*, 109, doi:10.20870/oeno-one.2002.36.3.970.
 29. Junquera, P.; Lissarrague, J.R.; Jiménez, L.; Linares, R.; Baeza, P. Long-Term Effects of Different Irrigation Strategies on Yield Components, Vine Vigour, and Grape Composition in Cv. Cabernet-Sauvignon (*Vitis Vinifera* L.). *Irrig Sci.* **2012**, *30*, 351–361, doi:10.1007/s00271-012-0348-y.
 30. Ruiz-Sanchez, M.C.; Domingo, R.; Castel, J.R. Review. Deficit Irrigation in Fruit Trees and Vines in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research.* **2010**, *8*, 5–20, doi:10.5424/sjar/201008S2-1343.
 31. Santos, J.A.; Fraga, H.; Malheiro, A.C.; Moutinho-Pereira, J.; Dinis, L.-T.; Correia, C.; Moriondo, M.; Leolini, L.; Dibari, C.; Costafreda-Aumedes, S.; et al. A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Applied Sciences.* **2020**, *10*, 3092, doi:10.3390/app10093092.
 32. Fraga, H.; García de Cortázar Atauri, I.; Santos, J.A. Viticultural Irrigation Demands under Climate Change Scenarios in Portugal. *Agric Water Manag.* **2018**, *196*, 66–74, doi:10.1016/j.agwat.2017.10.023.
 33. van Leeuwen, C.; Destrac-Irvine, A.; Dubernet, M.; Duchêne, E.; Gowdy, M.; Marguerit, E.; Pieri, P.; Parker, A.; de Rességuier, L.; Ollat, N. An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. *Agronomy.* **2019**, *9*, 514, doi:10.3390/agronomy9090514.
 34. Mancha, L.A.; Uriarte, D.; Valdés, E.; Moreno, D.; Prieto, M. del H. Effects of Regulated Deficit Irrigation and Early Cluster Thinning on Production and Quality Parameters in a Vineyard Cv. Tempranillo under Semi-Arid Conditions in Southwestern Spain. *Agronomy.* **2020**, *11*, 34, doi:10.3390/agronomy11010034.
 35. Keller, M. Deficit Irrigation and Vine Mineral Nutrition. *Am J Enol Vitic.* **2005**, *56*, 267–283, doi:10.5344/ajev.2005.56.3.267.

36. McCarthy, M.G. Developmental Variation in Sensitivity of *Vitis Vinifera* L. (Shiraz) Berries to Soil Water Deficit. *Aust J Grape Wine Res.* **2000**, *6*, 136–140, doi:10.1111/j.1755-0238.2000.tb00172.x.
37. Deloire, A.; Carbonneau, A.; Wang, Z.; Ojeda, H. Vine and Water: A Short Review. *OENO One.* **2004**, *38*, 1, doi:10.20870/oeno-one.2004.38.1.932.
38. Intrigliolo, D.S.; Pérez, D.; Risco, D.; Yeves, A.; Castel, J.R. Yield Components and Grape Composition Responses to Seasonal Water Deficits in Tempranillo Grapevines. *Irrig Sci.* **2012**, *30*, 339–349, doi:10.1007/s00271-012-0354-0.
39. Santesteban, L.G.; Miranda, C.; Royo, J.B. Regulated Deficit Irrigation Effects on Growth, Yield, Grape Quality and Individual Anthocyanin Composition in *Vitis Vinifera* L. Cv. 'Tempranillo.' *Agric Water Manag.* **2011**, *98*, 1171–1179, doi:10.1016/j.agwat.2011.02.011.
40. Baeza, P.; Conde, J.R.; Lissarrague, J.R.; Junquera, P. Agronomic and Ecophysiological Responses of Field-Grown "Cabernet Sauvignon" Grapevines to Three Irrigation Treatments. *Acta Hortic.* **2005**, 373–380, doi:10.17660/ActaHortic.2005.689.44.
41. Basile, B.; Girona, J.; Behboudian, M.H.; Mata, M.; Rosello, J.; Ferré, M.; Marsal, J. Responses of "Chardonnay" to Deficit Irrigation Applied at Different Phenological Stages: Vine Growth, Must Composition, and Wine Quality. *Irrig Sci.* **2012**, *30*, 397–406, doi:10.1007/s00271-012-0353-1.
42. Ferreyra E., R.; Sellés V., G.; Ruiz S., R.; Sellés M., I. Efecto Del Estrés Hídrico Aplicado En Distintos Periodos de Desarrollo de La Vid Cv. Chardonnay En El a Producción y Calidad Del Vino. *Agricultura Técnica.* **2003**, *63*, doi:10.4067/S0365-28072003000300007.
43. Gu, S.; Du, G.; Zoldoske, D.; Hakim, A.; Cochran, R.; Fugelsang, K.; Jorgensen, G. Effects of Irrigation Amount on Water Relations, Vegetative Growth, Yield and Fruit Composition of Sauvignon Blanc Grapevines under Partial Rootzone Drying and Conventional Irrigation in the San Joaquin Valley of California, USA. *J Hortic Sci Biotechnol.* **2004**, *79*, 26–33, doi:10.1080/14620316.2004.11511732.

44. Keller, M.; Romero, P.; Gohil, H.; Smithyman, R.P.; Riley, W.R.; Casassa, L.F.; Harbertson, J.F. Deficit Irrigation Alters Grapevine Growth, Physiology, and Fruit Microclimate. *Am J Enol Vitic.* **2016**, *67*, 426–435, doi:10.5344/ajev.2016.16032.
45. Schultz, H.; Matthews, M. Vegetative Growth Distribution During Water Deficits in *Vitis Vinifera* L. *Functional Plant Biology.* **1988**, *15*, 641, doi:10.1071/PP9880641.
46. Uriarte, D.; Mancha, L.A.; Moreno, D.; Bejarano, M.A.; Valdés, E.; Talaverano, I.; Prieto, M.H. Effects of Timing of Water Deficit Induction on ‘Doña Blanca’ White Grapevine under Semi-Arid Growing Conditions of South-Western Spain. *Acta Hortic.* **2017**, 493–500, doi:10.17660/ActaHortic.2017.1150.68.
47. Romero, P.; Navarro, J.M.; Ordaz, P.B. Towards a Sustainable Viticulture: The Combination of Deficit Irrigation Strategies and Agroecological Practices in Mediterranean Vineyards. A Review and Update. *Agric Water Manag.* **2022**, *259*, 107216, doi:10.1016/j.agwat.2021.107216.
48. Shellie, K.C. Vine and Berry Response of Merlot (*Vitis Vinifera* L.) to Differential Water Stress. *Am J Enol Vitic.* **2006**, *57*, 514–518, doi:10.5344/ajev.2006.57.4.514.
49. Ojeda, H.; Deloire, A.; Carbonneau, A.; Ageorges, A.; Romieu, C. Berry Development of Grapevines: Relations between the Growth of Berries and Their DNA Content Indicate Cell Multiplication and Enlargement. *Vitis Journal of Grapevine Research.* **1999**, *38*, 145–150, doi:10.5073/vitis.1999.38.145-150.
50. Poni, S.; Lakso, A.N.; Turner, J.R.; Melious, R.E. Interactions of Crop Level and Late Season Water Stress on Growth and Physiology of Field-Grown Concord Grapevines. *Am J Enol Vitic.* **1994**, *45*, 252–258, doi:10.5344/ajev.1994.45.2.252.
51. Matthews, M.A.; Nuzzo, V. Berry Size and Yield Paradigms on Grapes and Wines Quality. *Acta Hortic.* **2007**, 423–436, doi:10.17660/ActaHortic.2007.754.56.
52. Shellie, K.C. Water Productivity, Yield, and Berry Composition in Sustained versus Regulated Deficit Irrigation of Merlot Grapevines. *Am J Enol Vitic.* **2014**, *65*, 197–205, doi:10.5344/ajev.2014.13112.
53. Keller, M. Managing Grapevines to Optimise Fruit Development in a Challenging Environment: A Climate Change Primer for Viticulturists. *Aust J Grape Wine Res.* **2010**, *16*, 56–69, doi:10.1111/j.1755-0238.2009.00077.x.

54. Guilpart, N.; Metay, A.; Gary, C. Grapevine Bud Fertility and Number of Berries per Bunch Are Determined by Water and Nitrogen Stress around Flowering in the Previous Year. *European Journal of Agronomy*. **2014**, *54*, 9–20, doi:10.1016/j.eja.2013.11.002.
55. Molitor, D.; Baus, O.; Hoffmann, L.; Beyer, M. Meteorological Conditions Determine the Thermal-Temporal Position of the Annual Botrytis Bunch Rot Epidemic on *Vitis Vinifera* L. Cv. Riesling Grapes. *Oeno One*. **2016**, *50*, doi:https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.50.4.36.
56. Naor, A.; Bravdo, B.; Hepner, Y. Effect of Post-Veraison Irrigation Level on Sauvignon Blanc Yield, Juice Quality and Water Relations. *South African Journal of Enology & Viticulture*. **1993**, *14*, doi:10.21548/14-2-2172.
57. Munitz, S.; Netzer, Y.; Schwartz, A. Sustained and Regulated Deficit Irrigation of Field-Grown Merlot Grapevines. *Aust J Grape Wine Res*. **2017**, *23*, 87–94, doi:10.1111/ajgw.12241.
58. Romero, P.; Fernández-Fernández, J.I.; Martínez-Cutillas, A. Physiological Thresholds for Efficient Regulated Deficit-Irrigation Management in Winegrapes Grown under Semiarid Conditions. *Am. J. Enol. Vitic*. **2010**, *61*, 300–312, doi:10.5344/ajev.2010.61.3.300.
59. Stoll, M.; Loveys, B.; Dry, P. Hormonal Changes Induced by Partial Rootzone Drying of Irrigated Grapevine. *J Exp Bot*. **2000**, *51*, 1627–1634, doi:10.1093/jexbot/51.350.1627.
60. Dry, P.R.; Loveys, B.R.; Mccarthy, M.G.; Stoll, M. Strategic Irrigation Management in Australian Vineyards. *Oeno One*. **2001**, *35*, 129, doi:10.20870/oeno-one.2001.35.3.1699.
61. dos Santos, T.P.; Lopes, C.M.; Lucília Rodrigues, M.; de Souza, C.R.; Ricardo-da-Silva, J.M.; Maroco, J.P.; Pereira, J.S.; Manuela Chaves, M. Effects of Deficit Irrigation Strategies on Cluster Microclimate for Improving Fruit Composition of Moscatel Field-Grown Grapevines. *Sci Hort*. **2007**, *112*, 321–330, doi:10.1016/j.scienta.2007.01.006.
62. Du, T.; Kang, S.; Zhang, J.; Li, F.; Yan, B. Water Use Efficiency and Fruit Quality of Table Grape under Alternate Partial Root-Zone Drip Irrigation. *Agric Water Manag*. **2008**, *95*, 659–668, doi:10.1016/j.agwat.2008.01.017.

63. Gil, P.M.; Lobos, P.; Durán, K.; Olguín, J.; Cea, D.; Schaffer, B. Partial Root-Zone Drying Irrigation, Shading, or Mulching Effects on Water Savings, Productivity and Quality of 'Syrah' Grapevines. *Sci Hortic.* **2018**, *240*, 478–483, doi:10.1016/j.scienta.2018.06.050.
64. Uriarte Hernández, D. Moreno Cardona, D.; Prieto Losada, M.H.; Valdés Sánchez, E.; Rubio Cano, J.A.; Yuste Bombín, J. Study of Different Deficit Irrigation (Conventional and PRD [Partial Root Drying]) in Cv. Tempranillo in Extremadura (Spain). Effect on the Productive and Vegetative Aspects and on the Berry Composition. In Proceedings of the Viticultura Enología Profesional .; Viticultura Enología Profesional (España): Spain, **2006**.
65. Marsal, J.; Mata, M.; del Campo, J.; Arbones, A.; Vallverdú, X.; Girona, J.; Olivo, N. Evaluation of Partial Root-Zone Drying for Potential Field Use as a Deficit Irrigation Technique in Commercial Vineyards According to Two Different Pipeline Layouts. *Irrig Sci.* **2008**, *26*, 347–356, doi:10.1007/s00271-007-0098-4.
66. Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R. 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.* **2009**, *96*, 282–292, doi:10.1016/j.agwat.2008.08.001.
67. Bravdo, B.; Naor, A.; Zahavi, T.; Gal, Y. The Effect of Water Stress Applied Alternately to Part of the Wetting Zone along the Season (PRD-Partial Rootzone Drying) on Wine Quality, Yield and Water Relations of Red Wine Grapes. *Acta Hortic.* **2004**, 101–109, doi:10.17660/ActaHortic.2004.664.9.
68. Lampreave, M.; Mateos, A.; Valls, J.; Nadal, M.; Sánchez-Ortiz, A. Carbonated Irrigation Assessment of Grapevine Growth, Nutrient Absorption, and Sugar Accumulation in a Tempranillo (Vitis Vinifera L.) Vineyard. *Agriculture.* **2022**, *12*, 792, doi:10.3390/agriculture12060792.
69. Aguilera, P.; Ortiz, N.; Becerra, N.; Turrini, A.; Gáinza-Cortés, F.; Silva-Flores, P.; Aguilar-Paredes, A.; Romero, J.K.; Jorquera-Fontena, E.; Mora, M. de L.L.; et al. Application of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Vineyards: Water and Biotic Stress Under a Climate Change Scenario: New Challenge for Chilean Grapevine Crop. *Front Microbiol.* **2022**, *13*, doi:10.3389/fmicb.2022.826571.

70. Keller, M. Climate Change Impacts on Vineyards in Warm and Dry Areas: Challenges and Opportunities. *Am J Enol Vitic.* **2023**, *74*, 0740033, doi:10.5344/ajev.2023.23024.
71. Scholasch, T.; Rienth, M. Review of Water Deficit Mediated Changes in Vine and Berry Physiology; Consequences for the Optimization of Irrigation Strategies. *OENO One.* **2019**, *53*, doi:10.20870/oenone.2019.53.3.2407.
72. Wang, F.-X.; Kang, Y.; Liu, S.-P. Effects of Drip Irrigation Frequency on Soil Wetting Pattern and Potato Growth in North China Plain. *Agric Water Manag.* **2006**, *79*, 248–264, doi:10.1016/j.agwat.2005.02.016.
73. Bajpai, A.; Kaushal, A. Soil Moisture Distribution under Trickle Irrigation: A Review. *Water Supply.* **2020**, *20*, 761–772, doi:10.2166/ws.2020.005.
74. Ohana-Levi, N.; Mintz, D.F.; Hagag, N.; Stern, Y.; Munitz, S.; Friedman-Levi, Y.; Shacham, N.; Grünzweig, J.M.; Netzer, Y. Grapevine Responses to Site-Specific Spatiotemporal Factors in a Mediterranean Climate. *Agric Water Manag.* **2022**, *259*, 107226, doi:10.1016/j.agwat.2021.107226.
75. Yuste, J.; Montoro, A.; Cancela, J.J.; Martínez-Porro, D.; Mancha, L.A.; Moreno, D.; Torija, I.; Rodríguez-Febereiro, M.; Vilanova, M.; Uriarte, D. Irrigation Frequency in Red Varieties: Impact on Grape Production and Composition, during a Biennial Period, in 4 Regions of Spain. *BIO Web Conf.* **2023**, *68*, 01004, doi:10.1051/bioconf/20236801004.
76. Freeman, B.M.; Blackwell, J.; Garzoli, K. V Irrigation Frequency and Total Water Application with Trickle and Furrow Systems. *Agric Water Manag.* **1976**, *1*, 21–31, doi:10.1016/0378-3774(76)90004-4.
77. Montoro, A.; Mañas, F.; López-Urrea, R. Transpiration and Evaporation of Grapevine, Two Components Related to Irrigation Strategy. *Agric Water Manag.* **2016**, *177*, 193–200, doi:10.1016/j.agwat.2016.07.005.
78. Scholasch, T. Improving Winegrowing with Sap Flow Driven Irrigation – a 10-Year Review. *Acta Hortic.* **2018**, *1222*, 155–168, doi:10.17660/ActaHortic.2018.1222.21.
79. Myburgh, P.A. Comparing Irrigation Systems and Strategies for Table Grapes in the Weathered Granite-Gneiss Soils of the Lower Orange River Region. *South African Journal of Enology and Viticulture.* **2016**, *33*, doi:10.21548/33-2-1118.

80. Selles van Sch, G.; Ferreyra, R.E.; Contreras, G.W.; Ahumada, R.B.; Valenzuela, J.; Bravo, R.V. Effect of Three Irrigation Frequencies Applied by Drip Irrigation over Table Grapes (*Vitis Vinifera* Cv. Thompson Seedless) Located in the Aconcagua Valley Chile. *Acta Hortic.* **2004**, 175–181, doi:10.17660/ActaHortic.2004.646.22.
81. Sebastian, B.; Baeza, P.; Santesteban, L.G.; Miguel, P.; Fuente, M.; Lissarrague, J.R. Response of Grapevine Cv. Syrah to Irrigation Frequency and Water Distribution Pattern in a Clay Soil. *Agric Water Manag.* **2015**, 148, 269–279, doi:10.1016/j.agwat.2014.10.017.
82. Bowen, P.; Bogdanoff, C.; Usher, K.; Estergaard, B.; Cliff, M.; Stanich, Kareen. c Irrigation Frequency and Rate Effects on Vine Growth, Leaf Gas Exchange, Berry Composition, and Wine Sensory Quality in Red Winegrapes. *American Journal of Enology and Viticulture.* **2012**, 63, 77–78.
83. Amare, D.G.; Abebe, Z.K. Review on the Effect of Irrigation Interval on Different Crop Production. *Int J Plant Soil Sci.* **2020**, 1–13, doi:10.9734/ijpss/2020/v32i1430362.
84. Sun, R.; Ma, J.; Sun, X.; Zheng, L.; Bai, S. Responses of Soil Water–Root Coupling and Coupling Effects on Grapevines to Irrigation Methods in Extremely Arid Region. *Agric Water Manag.* **2024**, 302, 108984, doi:10.1016/j.agwat.2024.108984.
85. Orang, M.N.; Scott Matyac, J.; Snyder, R.L. Survey of Irrigation Methods in California in 2001. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* **2008**, 134, 96–100, doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:1(96).
86. 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, doi:10.1016/j.agwat.2011.10.013.
87. 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 doi:10.1016/j.agwat.2011.10.018.
88. Darouich, H.; Ramos, T.B.; Pereira, L.S.; Rabino, D.; Bagagiolo, G.; Capello, G.; Simionesei, L.; Cavallo, E.; Biddoccu, M. Water Use and Soil Water Balance of Mediterranean Vineyards under Rainfed and Drip Irrigation Management:

- Evapotranspiration Partition and Soil Management Modelling for Resource Conservation. *Water (Basel)*. **2022**, *14*, 554, doi:10.3390/w14040554.
89. Paço, T.A.; Ferreira, M.I.; Rosa, R.D.; Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Conceição, N.; Pacheco, C.A.; Pereira, L.S. The Dual Crop Coefficient Approach Using a Density Factor to Simulate the Evapotranspiration of a Peach Orchard: SIMDualKc Model versus Eddy Covariance Measurements. *Irrig Sci*. **2012**, *30*, 115–126, doi:10.1007/s00271-011-0267-3.
90. Dobriyal, P.; Qureshi, A.; Badola, R.; Hussain, S.A. A Review of the Methods Available for Estimating Soil Moisture and Its Implications for Water Resource Management. *J Hydrol (Amst)*. **2012**, *458–459*, 110–117, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.021.
91. He, H.; Aogu, K.; Li, M.; Xu, J.; Sheng, W.; Jones, S.B.; González-Teruel, J.D.; Robinson, D.A.; Horton, R.; Bristow, K.; et al. A Review of Time Domain Reflectometry (TDR) Applications in Porous Media. In; Sparks, D.L.B.T.-A. in A., Ed.; Academic Press, **2021**; Vol. 168, pp. 83–155 ISBN 0065-2113.
92. He, H.; Zou, W.; Jones, S.B.; Robinson, D.A.; Horton, R.; Dyck, M.; Filipović, V.; Noborio, K.; Bristow, K.; Gong, Y.; et al. Critical Review of the Models Used to Determine Soil Water Content Using TDR-Measured Apparent Permittivity. In; Sparks, D.L.B.T.-A. in A., Ed.; Academic Press, **2023**; Vol. 182, pp. 169–219 ISBN 0065-2113.
93. Millán, S. Puesta a Punto de Un Sistema de Riego Automático Para Cultivos Leñosos Bajo Diferentes Sistemas Productivos., Universidad de Extremadura. **2021**, url: <http://hdl.handle.net/10662/12482>
94. Fernández, J.E. Plant-Based Methods for Irrigation Scheduling of Woody Crops. *Horticulturae*. **2017**, *3*, 35, doi:10.3390/horticulturae3020035.
95. Rienth, M.; Scholasch, T. State-of-the-Art of Tools and Methods to Assess Vine Water Status. *OENO One*. **2019**, *53*, doi:10.20870/oeno-one.2019.53.4.2403.
96. Shellie, K.C.; Bowen, P. Isohydrodynamic Behavior in Deficit-Irrigated Cabernet Sauvignon and Malbec and Its Relationship between Yield and Berry Composition. *Irrig Sci*. **2014**, *32*, 87–97, doi:10.1007/s00271-013-0416-y.
97. Santesteban, L.G.; Miranda, C.; Marín, D.; Sesma, B.; Intrigliolo, D.S.; Mirás-Avalos, J.M.; Royo, J.B. 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.* **2019**, *221*, 202–210, doi:10.1016/j.agwat.2019.04.020.
98. Yuste, J.; Gutiérrez, I.; Rubio, J.; Albuquerque, M. d. V. Leaf and Stem Water Potential as Vine Water Status Indicators, in Tempranillo Grapevine, under Different Water Regimes in the Duero Valley. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin.* **2004**, *38*, 21–26, doi:10.20870/oeno-one.2004.38.1.940.
99. Gowdy, M.; Pieri, P.; Suter, B.; Marguerit, E.; Destrac-Irvine, A.; Gambetta, G.; van Leeuwen, C. Estimating Bulk Stomatal Conductance in Grapevine Canopies. *Front Plant Sci.* **2022**, *13*, 839378, doi:10.3389/fpls.2022.839378.
100. Fraga, H.; Malheiro, A.C.; Moutinho-Pereira, J.; Cardoso, R.M.; Soares, P.M.M.; Cancela, J.J.; Pinto, J.G.; Santos, J.A. Integrated Analysis of Climate, Soil, Topography and Vegetative Growth in Iberian Viticultural Regions. *PLoS One.* **2014**, *9*, e108078, doi:10.1371/journal.pone.0108078.
101. Costantini, E.A.C.; Castaldini, M.; Diago, M.P.; Giffard, B.; Lagomarsino, A.; Schroers, H.-J.; Priori, S.; Valboa, G.; Agnelli, A.E.; Akça, E.; et al. Effects of Soil Erosion on Agro-Ecosystem Services and Soil Functions: A Multidisciplinary Study in Nineteen Organically Farmed European and Turkish Vineyards. *J Environ Manage.* **2018**, *223*, 614–624, doi:10.1016/j.jenvman.2018.06.065.
102. Priori, S.; Pellegrini, S.; Perria, R.; Puccioni, S.; Storchi, P.; Valboa, G.; Costantini, E.A.C. Scale Effect of Terroir under Three Contrasting Vintages in the Chianti Classico Area (Tuscany, Italy). *Geoderma.* **2019**, *334*, 99–112, doi:10.1016/j.geoderma.2018.07.048.
103. Jasse, A.; Berry, A.; Aleixandre-Tudo, J.L.; Poblete-Echeverría, C. Intra-Block Spatial and Temporal Variability of Plant Water Status and Its Effect on Grape and Wine Parameters. *Agric Water Manag.* **2021**, *246*, 106696, doi:10.1016/j.agwat.2020.106696.
104. Araújo-Paredes, C.; Portela, F.; Mendes, S.; Valín, M.I. Using Aerial Thermal Imagery to Evaluate Water Status in *Vitis Vinifera* Cv. Loureiro. *Sensors.* **2022**, *22*, 8056, doi:10.3390/s22208056
105. Khaliq, A.; Comba, L.; Biglia, A.; Ricauda Aimonino, D.; Chiaberge, M.; Gay, P. Comparison of Satellite and UAV-Based Multispectral Imagery for Vineyard Variability Assessment. *Remote Sens (Basel).* **2019**, *11*, 436, doi:10.3390/rs11040436.

106. Ferro, M.V.; Catania, P. Technologies and Innovative Methods for Precision Viticulture: A Comprehensive Review. *Horticulturae*. **2023**, *9*, 399, doi:10.3390/horticulturae9030399.
107. Atencia Payares, L.K.; Tarquis, A.M.; Hermoso Peralo, R.; Cano, J.; Cámara, J.; Nowack, J.; Gómez del Campo, M. Multispectral and Thermal Sensors Onboard UAVs for Heterogeneity in Merlot Vineyard Detection: Contribution to Zoning Maps. *Remote Sens (Basel)*. **2023**, *15*, 4024, doi:/10.3390/rs15164024.
108. Messina, G.; Modica, G. Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook. *Remote Sens (Basel)*. **2020**, *12*, 1491, doi:10.3390/rs12091491.
109. Gago, J.; Douthe, C.; Coopman, R.E.; Gallego, P.P.; Ribas-Carbo, M.; Flexas, J.; Escalona, J.; Medrano, H. UAVs Challenge to Assess Water Stress for Sustainable Agriculture. *Agric Water Manag.* **2015**, *153*, 9–19, doi:10.1016/j.agwat.2015.01.020.
110. Pádua, L.; Marques, P.; Adão, T.; Guimarães, N.; Sousa, A.; Peres, E.; Sousa, J.J. Vineyard Variability Analysis through UAV-Based Vigour Maps to Assess Climate Change Impacts. *Agronomy*. **2019**, *9*, doi:10.3390/agronomy9100581.
111. Radoglou-Grammatikis, P.; Sarigiannidis, P.; Lagkas, T.; Moscholios, I. A Compilation of UAV Applications for Precision Agriculture. *Computer Networks*. **2020**, *172*, 107148, doi:10.1016/j.comnet.2020.107148.
112. Baluja, J.; Diago, M.P.; Balda, P.; Zorer, R.; Meggio, F.; Morales, F.; Tardaguila, J. Assessment of Vineyard Water Status Variability by Thermal and Multispectral Imagery Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Irrig. Sci.* **2012**, *30*, 511–522, doi:10.1007/s00271-012-0382-9.
113. Costa, J.M.; Egipto, R.; Sánchez-Virosta, A.; Lopes, C.M.; Chaves, M.M. Canopy and Soil Thermal Patterns to Support Water and Heat Stress Management in Vineyards. *Agric Water Manag.* **2019**, *216*, 484–496, doi:10.1016/j.agwat.2018.06.001.
114. Bellvert, J.; Zarco-Tejada, P.J.; Marsal, J.; Girona, J.; González-Dugo, V.; Fereres, E. Vineyard Irrigation Scheduling Based on Airborne Thermal Imagery and Water Potential Thresholds. *Aust J Grape Wine Res.* **2016**, *22*, 307–315, doi:10.1111/ajgw.12173.

115. García-Tejero, I.F.; Costa, J.M.; Egipto, R.; Durán-Zuazo, V.H.; Lima, R.S.N.; Lopes, C.M.; Chaves, M.M. Thermal Data to Monitor Crop-Water Status in Irrigated Mediterranean Viticulture. *Agric. Water Manage.* **2016**, *176*, 80–90, doi:10.1016/j.agwat.2016.05.008.
116. García-Tejero, I.F.; Rubio, A.E.; Viñuela, I.; Hernández, A.; Gutiérrez-Gordillo, S.; Rodríguez-Pleguezuelo, C.R.; Durán-Zuazo, V.H. Thermal Imaging at Plant Level to Assess the Crop-Water Status in Almond Trees (Cv. Guara) under Deficit Irrigation Strategies. *Agric. Water Manage.* **2018**, *208*, 176–186, doi:10.1016/j.agwat.2018.06.002.
117. Petrie, P.R.; Wang, Y.; Liu, S.; Lam, S.; Whitty, M.A.; Skewes, M.A. The Accuracy and Utility of a Low Cost Thermal Camera and Smartphone-Based System to Assess Grapevine Water Status. *Biosyst. Eng.* **2019**, *179*, 126–139, doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.01.002.
118. Pou, A.; Diago, M.P.; Medrano, H.; Baluja, J.; Tardaguila, J. Validation of Thermal Indices for Water Status Identification in Grapevine. *Agric. WaterManag.* **2014**, *134*, 60–72, doi:10.1016/j.agwat.2013.11.010.
119. Idso, S.B. Non-Water-Stressed Baselines: A Key to Measuring and Interpreting Plant Water Stress. *Agricultural Meteorology.* **1982**, *27*, 59–70, doi:10.1016/0002-1571(82)90020-6.
120. Jones, HG. Use of Infrared Thermometry for Estimation of Stomatal Conductance as a Possible Aid to Irrigation Scheduling. *Agric For Meteorol.* **1999**, *95*, 139–149.
121. Bellvert, J.; Marsal, J.; Girona, J.; Zarco-Tejada, P.J. Seasonal Evolution of Crop Water Stress Index in Grapevine Varieties Determined with High-Resolution Remote Sensing Thermal Imagery. *Irrig Sci.* **2015**, *33*, 81–93, doi:10.1007/s00271-014-0456-y.
122. Santesteban, L.G.; Di Gennaro, S.F.; Herrero-Langreo, A.; Miranda, C.; Royo, J.B.; Matese, A. High-Resolution UAV-Based Thermal Imaging to Estimate the Instantaneous and Seasonal Variability of Plant Water Status within a Vineyard. *Agr. Water. Manage.* **2017**, *183*, 49–59, doi:10.1016/j.agwat.2016.08.026.
123. Phogat, V.; Pitt, T.; Stevens, R.M.; Cox, J.W.; Šimůnek, J.; Petrie, P.R. Assessing the Role of Rainfall Redirection Techniques for Arresting the Land Degradation under Drip

- Irrigated Grapevines. *J Hydrol (Amst)*. **2020**, 587, 125000, doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125000.
124. Stöckle, C.O.; Donatelli, M.; Nelson, R. CropSyst, a Cropping Systems Simulation Model. *European Journal of Agronomy*. **2003**, 18, 289–307, doi:10.1016/S1161-0301(02)00109-0.
125. Marsal, J.; Utset, A. Vineyard Full-Irrigation Requirements under Climate Change Scenarios for the Ebro Valley, Spain. In Proceedings of the VIII International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management. Samietz, J., Ed.; Int Soc Horticultural Science: Po Box 500, 3001 Leuven 1, Belgium, **2008**; Vol. 803, pp. 131–138. url: <http://www.hortplus.com/ISHSModel/symposium2007.htm>
126. Kustas, W.P.; Alfieri, J.G.; Nieto, H.; Wilson, T.G.; Gao, F.; Anderson, M.C. Utility of the Two-Source Energy Balance (TSEB) Model in Vine and Interrow Flux Partitioning over the Growing Season. *Irrig Sci*. **2019**, 37, 375–388, doi:10.1007/s00271-018-0586-8.
127. Kool, D.; Kustas, W.P.; Ben-Gal, A.; Agam, N. Energy Partitioning between Plant Canopy and Soil, Performance of the Two-Source Energy Balance Model in a Vineyard. *Agric For Meteorol*. **2021**, 300, 108328, doi:10.1016/j.agrformet.2021.108328.
128. Loddò, S.; Soccol, M.; Perra, A.; Ucchesu, M.; Meloni, P.; Barbaro, M.; Cascio, M. Lo; Sirca, C. Biosensing IoT Platform for Water Management in Vineyards. In Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS); IEEE, October **2020**; pp. 1–4. url: <https://doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9181301>
129. Millán, S.; Campillo, C.; Casadesús, J.; Pérez-Rodríguez, J.M.; Prieto, M.H. Automatic Irrigation Scheduling on a Hedgerow Olive Orchard Using an Algorithm of Water Balance Readjusted with Soil Moisture Sensors. *Sensors*. **2020**, 20, 2526, doi:10.3390/s20092526.
130. Domínguez-Niño, J.M.; Oliver-Manera, J.; Girona, J.; Casadesús, J. Differential Irrigation Scheduling by an Automated Algorithm of Water Balance Tuned by Capacitance-Type Soil Moisture Sensors. *Agric Water Manag*. **2020**, 228, 105880, doi:10.1016/j.agwat.2019.105880.
131. Millán, S.; Casadesús, J.; Campillo, C.; Moñino, M.J.; Prieto, M.H. Using Soil Moisture Sensors for Automated Irrigation Scheduling in a Plum Crop. *Water (Basel)*. **2019**, 11, 2061, doi:10.3390/w11102061.

132. Bellvert, J.; Pelechá, A.; Pamies-Sans, M.; Virgili, J.; Torres, M.; Casadesús, J. Assimilation of Sentinel-2 Biophysical Variables into a Digital Twin for the Automated Irrigation Scheduling of a Vineyard. *Water (Basel)*. **2023**, *15*, 2506, doi:10.3390/w15142506.
133. Cancela, J.J.; Fandiño, M.; Rey, B.J.; Rosa, R.; Pereira, L.S. Estimating Transpiration and Soil Evaporation of Vineyards from the Fraction of Ground Cover and Crop Height -Application to “Albariño” Vineyards of Galicia. *Acta Hortic.* **2012**, 227–234, doi:10.17660/ActaHortic.2012.931.25.
134. Cancela, J.J.; Fandino, M.; Rey, B.J.; Martinez, E.M. Automatic Irrigation System Based on Dual Crop Coefficient, Soil and Plant Water Status for Vitis Vinifera (Cv Godello and Cv Mencia). *Agricultura Water Management*. **2015**, *151*, 52–63, doi:10.1016/j.agwat.2014.10.020.
135. Fandiño, M.; Cancela, J.J.; Rey, B.J.; Martínez, E.M.; Rosa, R.G.; Pereira, L.S. Using the Dual-Kc 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, doi:10.1016/j.agwat.2012.06.008.
136. Silva, S.P.; Isabel Valin, M.; Mendes, S.; Araujo-Paredes, C.; Cancela, J.J. Dual Crop Coefficient Approach in Vitis Vinifera L. Cv. Loureiro. *Agronomy-Basel*. **2021**, *11*, doi:10.3390/agronomy11102062.
137. Čadro, S.; Omerović, Z.; Soares, D.; Crljenković, B.; Almeida, W.S.; Šipka, M.; Makaš, M.; Todorović, M.; Paço, T.A. Upgrading Maize Cultivation in Bosnia and Herzegovina from Rainfed to Irrigated Systems: Use of Remote Sensing Data and the Dual Crop Coefficient Approach to Estimate Evapotranspiration. *Water (Basel)*. **2024**, *16*, 1797, doi:10.3390/w16131797.
138. Gao, Y.; Yang, L.; Shen, X.; Li, X.; Sun, J.; Duan, A.; Wu, L. Winter Wheat with Subsurface Drip Irrigation (SDI): Crop Coefficients, Water-Use Estimates, and Effects of SDI on Grain Yield and Water Use Efficiency. *Agric Water Manag.* **2014**, *146*, 1–10, doi:10.1016/j.agwat.2014.07.010.
139. Miao, Q.; Rosa, R.D.; Shi, H.; Paredes, P.; Zhu, L.; Dai, J.; Gonçalves, J.M.; Pereira, L.S. Modeling Water Use, Transpiration and Soil Evaporation of Spring Wheat–Maize

- and Spring Wheat–Sunflower Relay Intercropping Using the Dual Crop Coefficient Approach. *Agric Water Manag.* **2016**, *165*, 211–229, doi:10.1016/j.agwat.2015.10.024.
140. Petry, M.T.; Tonetto, F.; Martins, J.D.; Slim, J.E.; Werle, R.; Gonçalves, A.F.; Paredes, P.; Pereira, L.S. Evapotranspiration and Crop Coefficients of Sprinkler-Irrigated Aerobic Rice in Southern Brazil Using the SIMDualKc Water Balance Model. *Irrig Sci.* **2024**, doi:10.1007/s00271-024-00917-7.
141. Petry, M.T.; Magalhães, T.F.; Paredes, P.; Martins, J.D.; Ferrazza, C.M.; Hünemeier, G.A.; Pereira, L.S. Water Use and Crop Coefficients of Soybean Cultivars of Diverse Maturity Groups and Assessment of Related Water Management Strategies. *Irrig Sci.* **2023**, doi:10.1007/s00271-023-00871-w.
142. Puig-Sirera, À.; Rallo, G.; Paredes, P.; Paço, T.A.; Minacapilli, M.; Provenzano, G.; Pereira, L.S. Transpiration and Water Use of an Irrigated Traditional Olive Grove with Sap-Flow Observations and the FAO56 Dual Crop Coefficient Approach. *Water (Basel)*. **2021**, *13*, 2466, doi:10.3390/w13182466.
143. Darouich, H.; Karfoul, R.; Ramos, T.B.; Pereira, L.S. Setting Irrigation Thresholds for Building a Platform Aimed at the Improved Management of Citrus Orchards in Coastal Syria. *Agronomy* **2023**, *13*, 1794, doi:10.3390/agronomy13071794.
144. Ramos, T.B.; Darouich, H.; Oliveira, A.R.; Farzadian, M.; Monteiro, T.; Castanheira, N.; Paz, A.; Gonçalves, M.C.; Pereira, L.S. Water Use and Soil Water Balance of Mediterranean Tree Crops Assessed with the SIMDualKc Model in Orchards of Southern Portugal. *Agric Water Manag.* **2023**, *279*, 108209, doi:10.1016/j.agwat.2023.108209.
145. Hu, Y.; Kang, S.; Ding, R.; Du, T.; Tong, L.; Li, S. The Dynamic Yield Response Factor of Alfalfa Improves the Accuracy of Dual Crop Coefficient Approach under Water and Salt Stress. *Water (Basel)*. **2020**, *12*, 1224, doi:10.3390/w12051224.
146. Darouich, H.; Karfoul, R.; Eid, H.; Ramos, T.B.; Baddour, N.; Moustafa, A.; Assaad, M.I. Modeling Zucchini Squash Irrigation Requirements in the Syrian Akkar Region Using the FAO56 Dual-Kc Approach. *Agric Water Manag.* **2020**, *229*, 105927, doi:10.1016/j.agwat.2019.105927.

147. Zhang, H.; Huang, G.; Xu, X.; Xiong, Y.; Huang, Q. Estimating Evapotranspiration of Processing Tomato under Plastic Mulch Using the SIMDualKc Model. *Water (Basel)*. **2018**, *10*, 1088, doi:10.3390/w10081088.
148. Qiu, R.; Du, T.; Kang, S.; Chen, R.; Wu, L. Assessing the SIMDualKc Model for Estimating Evapotranspiration of Hot Pepper Grown in a Solar Greenhouse in Northwest China. *Agric Syst*. **2015**, *138*, 1–9, doi:10.1016/j.agry.2015.05.001.
149. Nyawade, S.O.; Gitari, H.I.; Karanja, N.N.; Gachene, C.K.K.; Schulte-Geldermann, E.; Parker, M.L. Yield and Evapotranspiration Characteristics of Potato-Legume Intercropping Simulated Using a Dual Coefficient Approach in a Tropical Highland. *Field Crops Res*. **2021**, *274*, 108327, doi:10.1016/j.fcr.2021.108327.
150. Paredes, P.; Pereira, L.S.; Rodrigues, G.C.; Botelho, N.; Torres, M.O. Using the FAO Dual Crop Coefficient Approach to Model Water Use and Productivity of Processing Pea (*Pisum Sativum* L.) as Influenced by Irrigation Strategies. *Agric Water Manag* **2017**, *189*, 5–18, doi:10.1016/j.agwat.2017.04.010.
151. Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Cameira, M. do R.; Torres, M.O.; Pereira, L.S. Assessing Yield, Water Productivity and Farm Economic Returns of Malt Barley as Influenced by the Sowing Dates and Supplemental Irrigation. *Agric Water Manag*. **2017**, *179*, 132–143, doi:10.1016/j.agwat.2016.05.033.
152. Cao, H.; Wang, H.; Li, Y.; Hamani, A.K.M.; Zhang, N.; Wang, X.; Gao, Y. Evapotranspiration Partition and Dual Crop Coefficients in Apple Orchard with Dwarf Stocks and Dense Planting in Arid Region, Aksu Oasis, Southern Xinjiang. *Agriculture*. **2021**, *11*, 1167, doi:10.3390/agriculture11111167.
153. Wu, N.; Yang, C.; Luo, Y.; Sun, L. Estimating Evapotranspiration and Its Components in Cotton Fields under Deficit Irrigation Conditions. *Pol J Environ Stud*. **2018**, *28*, 393–405, doi:10.15244/pjoes/80895.
154. Zhao, P.; Kang, S.; Li, S.; Ding, R.; Tong, L.; Du, T. Seasonal Variations in Vineyard ET Partitioning and Dual Crop Coefficients Correlate with Canopy Development and Surface Soil Moisture. *Agricultura Water Management*. **2018**, *197*, 19–33, doi:10.1016/j.agwat.2017.11.004.

Referencias bibliográficas

155. Celette, F.; Ripoche, A.; Gary, C. WaLIS—A Simple Model to Simulate Water Partitioning in a Crop Association: The Example of an Intercropped Vineyard. *Agric Water Manag.* **2010**, *97*, 1749–1759, doi:10.1016/j.agwat.2010.06.008.
156. Campos, I.; Neale, C.M.U.; Calera, A.; Balbontín, C.; González-Piqueras, J. Assessing Satellite-Based Basal Crop Coefficients for Irrigated Grapes (*Vitis Vinifera* L.). *Agric Water Manag.* **2010**, *98*, 45–54, doi:10.1016/j.agwat.2010.07.011.
157. 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, doi:10.1007/s002710050043.
158. Jones, M. Google Earth. Available online: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html> (accessed on 1 July 2024).
159. Lund, E.D.; Colin, P.E.; Christy, D.; Drummond, P.E. Applying Soil Electrical Conductivity Technology to Precision Agriculture. **1999**, *95* (3), 1089–1100, doi:10.2134/agronj2003.0455.
160. Siqueira, G.M. Medida de La Conductividad Eléctrica Aparente Del Suelo Por Inducción Electromagnética y Variabilidad Espacial de Propiedades Físicas y Químicas Del Suelo. **2009**, url: <http://hdl.handle.net/10347/2593>
161. Hossain, M.B.; Lamb, D.W.; Lockwood, P. V.; Frazier, P. EM38 for Volumetric Soil Water Content Estimation in the Root-Zone of Deep Vertisol Soils. *Comput Electron Agric.* **2010**, *74*, 100–109, doi:10.1016/j.compag.2010.07.003.
162. Rhoades, J.D.; Manteghi, N.A.; Shouse, P.J.; Alves, W.J. *Estimation of Soil Salinity from Electrical Conductivity Measurements of Saturated Soil-Paste*. FAO. **1989**, url:<https://agris.fao.org/search/en/providers/122621records/6471d4f677fd37171a70482a>
163. Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Myers, D.B.; Drummond, S.T.; Hong, S.Y. Delineating Productivity Zones on Claypan Soil Fields Using Apparent Soil Electrical Conductivity. *Comput Electron Agric.* **2005**, *46*, 285–308, doi:10.1016/j.compag.2004.11.012.
164. Serrano, J.M.; Peça, J.O.; Marques da Silva, J.R.; Shaidian, S. Mapping Soil and Pasture Variability with an Electromagnetic Induction Sensor. *Comput Electron Agric.* **2010**, *73*, 7–16, doi:10.1016/j.compag.2010.03.008.
165. Corwin, D.L.; Lesch, S.M. Apparent Soil Electrical Conductivity Measurements in Agriculture. *Comput Electron Agric.* **2005**, *46*, 11–43, doi:10.1016/j.compag.2004.10.005.

166. Corwin, D.L.; Scudiero, E. Field-scale Apparent Soil Electrical Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. **2020**, *84*, 1405–1441, doi:10.1002/saj2.20153.
167. Rosa, R.; Paredes, P.; Rodrigues, G.; Sequeira, B.; Godinho, P.; Rolim, J.; Teodoro, R.P. SIMDualKc Simulation Model Download Web Page of the High Institute of Agronomy of the University of Lisbon. Available online: <https://www.isa.ulisboa.pt/en/leaf/downloads> (accessed on 23 July 2024).
168. Allen, R.G.; Pereira, L.S. Estimating Crop Coefficients from Fraction of Ground Cover and Height. *Irrig Sci*. **2009**, *28*, 17–34, doi:10.1007/s00271-009-0182-z.
169. Zhang, R.; Cheng, Z.; Zhang, J.; Ji, X. Sandy Loam Soil Wetting Patterns of Drip Irrigation: A Comparison of Point and Line Sources. *Procedia Eng*. **2012**, *28*, 506–511, doi:10.1016/j.proeng.2012.01.759.
170. Singh, D.K.; Rajput, T.B.S.; Singh, D.K.; Sikarwar, H.S.; Sahoo, R.N.; Ahmad, T. Simulation of Soil Wetting Pattern with Subsurface Drip Irrigation from Line Source. *Agric Water Manag*. **2006**, *83*, 130–134, doi:10.1016/j.agwat.2005.11.002.
171. Loveys, B.R.; Jones, H.G.; Theobald, J.C.; McCarthy, M.G. An Assessment of Plant-Based Measures of Grapevine Performance as Irrigation Scheduling Tools. *Acta Hort*. **2008**, *792*, 421–427, doi:10.17660/ActaHortic.2008.792.49.

-