



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Monitorización del estado hídrico del viñedo utilizando una herramienta multispectral no destructiva sobre una plataforma móvil terrestre.

Autor/es

Fernando Rubio Ordoyo

Director/es

MARÍA PAZ DIAGO SANTAMARÍA y JUAN FERNÁNDEZ NOVALES

Facultad

Facultad de Ciencia y Tecnología

Titulación

Grado en Enología

Departamento

AGRICULTURA Y ALIMENTACIÓN

Curso académico

2021-22



Monitorización del estado hídrico del viñedo utilizando una herramienta multispectral no destructiva sobre una plataforma móvil terrestre., de Fernando Rubio Ordoyo

(publicada por la Universidad de La Rioja) se difunde bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported. Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los titulares del copyright.



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

Facultad de Ciencia y Tecnología

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Enología

**Monitorización del estado hídrico del
viñedo utilizando una herramienta
multiespectral no destructiva sobre una
plataforma móvil terrestre**



Autor: Fernando Rubio Ordoyo

Tutores: M.^a Paz Diago Santamaría

Juan Fernández Novales

Logroño, julio de 2022

INDICE

Páginas

0. RESUMEN / ABSTRACT.....	4
1. INTRODUCCIÓN:.....	6
1.1. Desafíos actuales de la viticultura.....	7
1.1.1. Empleo del riego como herramienta de sostenibilidad	9
1.1.2. Influencia del cambio climático.....	12
1.2. Métodos para la medición del estado hídrico de la vid	14
1.2.1. Métodos convencionales:	14
1.2.1.1. Métodos basados en la demanda atmosférica	14
1.2.1.2. Métodos basados en la determinación de la humedad del suelo.....	16
1.2.1.3. Métodos basados en la medida directa de la planta.....	19
1.2.1.4. Ventajas y desventajas de los métodos convencionales	22
1.2.2. Nuevos métodos de medida no invasivos:.....	26
1.2.2.1. Termografía	28
1.2.2.2. Espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS).....	30
1.2.2.3. Cámaras multiespectrales	31
2. OBJETIVOS:	32
3. MATERIALES Y MÉTODOS:.....	33
3.1. Diseño experimental.....	33
3.1.1. Viñedo experimental (I).....	34
3.1.2. Viñedo experimental (II)	35
3.2. Adquisición de las medidas espectrales.....	35
3.3. Medición del potencial hídrico en tallo como método de referencia.....	40
3.4. Procesado de las medidas espectrales.....	40
3.4.1. Pretratamiento de los espectros	40
3.4.2. Tratamiento espectral	41
3.5. Generación de mapas.....	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1. Valores de referencia del estado hídrico del viñedo (Ψ_{stem}).....	43
4.2. Modelos de regresión para la predicción del estado hídrico	46
4.2.1. Modelo de regresión seleccionado para la predicción del estado hídrico del viñedo experimental (I).....	47
4.2.2. Modelo de regresión seleccionado para la predicción del estado hídrico del viñedo experimental (II).....	48

4.3.	Monitorización del estado hídrico de los viñedos experimentales.	50
4.3.1.	Viñedo experimental (I) [Tempranillo].....	51
4.3.2.	Viñedo experimental (II) [Graciano]	55
5.	CONCLUSIONES	59
6.	BIBLIOGRAFÍA	60

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Dra. María Paz Diago y Juan Fernández Novales por brindarme los medios, conocimientos y ánimo para desarrollar este trabajo. A todos mis amigos que siempre me han acompañado durante este periodo académico. Y, por último, pero no por eso menos importante, le doy las gracias a mi familia, en especial a mis padres y hermano, por los valores y principios inculcados y por su apoyo incondicional.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Ψ :	Potencial hídrico
Ψ_b :	Potencial hídrico base
Ψ_l :	Potencial hídrico en hoja
Ψ_{stem} :	Potencial hídrico en tallo
Ψ_{PD} :	Potencial hídrico antes del amanecer en hoja y tallo
g_s :	Conductancia estomática
ET_o :	Evapotranspiración potencial o de referencia
K_c :	Coefficiente de cultivo
T_{wet} :	Temperatura máxima de evapotranspiración
T_{dry} :	Temperatura más alta posible de la hoja cuando no hay transpiración
NIR	Infrarrojo cercano
NIRS	Espectroscopía del infrarrojo cercano
PCA	Análisis de componentes principales
PLS	Regresión por mínimos cuadrados parciales
R^2	Coefficiente de determinación
R^2_{cv}	Coefficiente de determinación de validación cruzada
RMSEC	Error cuadrático medio de calibración
RMSECV	Error cuadrático medio de validación cruzada
LV	Variables latentes

0. RESUMEN / ABSTRACT

RESUMEN:

La evaluación del estado hídrico y la optimización del riego son prácticas de vital importancia para el crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad de cualquier explotación vitícola. Al mismo tiempo, las condiciones impuestas por el cambio climático como las variaciones en los patrones de precipitación o el aumento de las temperaturas afectan no solo a la rentabilidad sino también a la sostenibilidad del sector vitivinícola. Por ello, se debe realizar una monitorización representativa y objetiva del estado hídrico del viñedo, reemplazando los métodos clásicos que requieren de una elevada mano de obra y tiempo por métodos no destructivos, automatizados y fiables de un coste económico razonable.

La finalidad de este trabajo fue la evaluación de un método no destructivo y rápido para la monitorización y estimación del estado hídrico del viñedo mediante la utilización de un sensor de espectrofotometría NIRS de bajo coste instalado en una plataforma móvil terrestre. Este método se aplicó al mediodía solar, en dos viñedos experimentales ubicados en la localidad de Tudelilla (La Rioja) y en los que se habían impuesto distintos tratamientos de riego. Se realizaron mediciones de potencial hídrico empleando un método de referencia al mismo tiempo que se adquirían las medidas espectrales mediante el empleo de un vehículo terrestre móvil.

Se realizaron distintas combinaciones de pretratamientos espectrales con los datos obtenidos en campo, para posteriormente desarrollar numerosos modelos de predicción del estado hídrico. La construcción de los modelos se llevó a cabo utilizando técnicas quimiométricas de análisis cuantitativo mediante validación cruzada. Se eligieron los mejores modelos de predicción para ambos viñedos experimentales y se generaron mapas de interpolación (con un sistema de información geográfica, SIG) con los valores de potencial hídrico predichos por el modelo y los obtenidos por el método de referencia.

Se evaluó la evolución y variabilidad espacial del estado hídrico para cada parcela y la semejanza entre los mapas de interpolación elaborados por el modelo de predicción y por el método de referencia para cada viñedo experimental. Los resultados obtenidos y valorados en este estudio demostraron la viabilidad de la espectrofotometría NIRS y la capacidad de este sensor de bajo coste de predecir de forma fiable y rápida el estado hídrico de una explotación vitivinícola.

TITLE:

Monitorization of the vineyard water status using a non-destructive multispectral tool from a ground moving platform.

ABSTRACT:

The evaluation of plant water status and the optimization of irrigation are practices of vital importance for the vegetative growth, yield, and quality of any winegrowing development. At the same time, conditions imposed by climate change, such as variations in precipitation patterns or rising temperatures, affect not only the profitability but also the sustainability of the winegrowing sector. Therefore, a representative and objective monitorization of the vineyard water status should be carried out, replacing the classic methods that require a high labor and time by non-destructive, automated, and reliable methods of a reasonable economic cost.

The purpose of this work was to evaluate a non-destructive and rapid method for the monitorization and estimation of vineyard water status using a low-cost NIRS spectrophotometry sensor installed on a ground moving platform. This method was applied at solar noon, in two experimental vineyards located in the town of Tudelilla (La Rioja) and in which different irrigation treatments had been imposed. Stem water potential measurements were acquired as the reference method, contemporarily to spectral acquisition from a ground moving vehicle.

Different combinations of spectral pretreatments were made with the data obtained in the field, to later develop numerous models of prediction of the water status. Model building was carried out using chemometric techniques of quantitative analysis by using cross-validation. The best prediction models were chosen for both experimental vineyards and interpolation maps were generated (with a geographical information system, GIS).

We evaluated the evolution and spatial variability of the water status for each plot and the similarity between the interpolation maps prepared by the prediction model and the reference method for each experimental vineyard. The results obtained and valued in this study demonstrated the viability of NIRS spectrophotometry and the ability of this low-cost sensor to predict the water status of a winegrowing development reliably and quickly.

1. INTRODUCCIÓN:

La vid es una planta con pequeñas necesidades de agua para su cultivo en comparación con otros cultivos herbáceos o leñosos mediterráneos, siendo solo equiparable con el olivo. Esto se debe principalmente a su fuerte sistema radicular, capaz de profundizar en el suelo y con un gran poder de succión, confiriéndole una gran resistencia a largos períodos de sequía (Togores & Fernández-Cano 2011). Sin embargo, aunque sus necesidades hídricas sean pequeñas y sea una especie tolerante a la sequía, el agua es un factor de vital importancia para el viñedo, ya que, para completar su ciclo de crecimiento con éxito, esas necesidades aumentan al coincidir con los meses más secos del año, como se muestra en la Tabla 1 (Diago 2022).

Tabla 1. Estimación de las necesidades hídricas medias en España por mes de la viña.

Mes	Parral (m ³ /ha)	Espaldera (m ³ /ha)
Enero	50 a 100	50 a 75
Febrero	75 a 150	75 a 125
Marzo	150 a 200	125 a 175
Abril	175 a 250	150 a 200
Mayo	300 a 400	250 a 325
Junio	450 a 550	350 a 450
Julio	550 a 650	450 a 525
Agosto	450 a 600	350 a 475
Septiembre	300 a 400	250 a 325
Octubre	150 a 200	125 a 175
Noviembre	75 a 150	75 a 125
Diciembre	50 a 150	50 a 75
TOTAL	2.775 a 3.800	2.300 a 3.050

Fuente: Tratado de viticultura. Volumen I y II. José Hidalgo Togores, Hidalgo Fernández-Cano, L.

El agua también interviene participando en reacciones bioquímicas o siendo un medio de disolución. Un adecuado estado hídrico influye positivamente en el crecimiento (posibilitando el movimiento de sustancias a través de la planta) y en la regulación térmica de la planta a través de la transpiración (intercambio de energía), funciones que están ligadas a la fotosíntesis y que por lo tanto influyen en la producción (mayor fertilidad (iniciación floral), corrimiento (variedad, patrón, clima), peso y número de bayas, regularidad de las cosechas en el tiempo), en el desarrollo vegetativo (crecimiento de pámpanos, superficie foliar, senescencia, agostamiento, etc.) y en la composición de la uva (distribución de los fotoasimilados (azúcares, acidez, pH, compuestos fenólicos, precursores de aromas) y en el retraso de la maduración) (Figura 1). Por lo tanto, se puede afirmar que la evolución del estado hídrico de un viñedo influye en la calidad y tipicidad de un vino (Diago et al., 2018; Yuste et al., 2017; Togores & Fernández-Cano 2011).

(A)	Trat.	Madera	N°	N°	N°	Peso	Rdto.	N°	Peso	Peso	N°
		Poda	Sarm.	trancos	chup.	Sarm.		Racimos	Racimo	Baya	Bayas
2012	P0	0,518 b	12,3	10,9	1,4	43,2	1,46	18,8	77 b	0,74	106
	P1	0,580 b	12,8	11,2	1,6	45,7	2,07	19,6	106 a	0,93	115
	P2	0,738 a	12,8	11,0	1,8	57,7	2,35	19,7	118 a	0,97	121
	Sig.	*	-	-	-	-	-	-	*	-	-
2013	P0	0,741 c	14,2 b	11,6	2,7	52,1 c	2,94	24,0	123	1,09 b	112
	P1	1,101 b	15,7 a	12,2	3,5	70,7 b	3,40	24,4	137	1,29 a	106
	P2	1,501 a	15,8 a	11,6	4,2	97,1 a	3,82	24,8	153	1,30 a	118
	Sig.	*	*	-	-	*	-	-	-	*	-
2014	P0	0,855 b	12,5	11,4	1,1	70,0	2,00	18,1	111	1,36	81
	P1	1,090 ab	12,3	11,1	1,2	88,8	2,53	20,1	126	1,32	96
	P2	1,275 a	12,8	11,4	1,4	100,3	2,88	22,6	127	1,41	90
	Sig.	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Media	P0	0,705	13,0	11,3	1,7	55,1	2,71	20,3	104	1,06	106
	P1	0,923	13,6	11,5	2,1	68,4	2,67	21,4	123	1,18	105
	P2	1,171	13,8	11,3	2,5	85,1	3,01	22,4	133	1,23	110

(B)	Trat.	S.S.T.	pH	Acidez	Ácido	Ácido	Potasio	I.P.T.	Índice
				titulable	tartárico	málico			Ravaz
2012	P0	22,63 b	3,94	3,63 b	6,08	0,74 b	1503	10,75	2,88
	P1	23,70 a	4,05	4,50 a	6,61	0,92 b	1653	10,25	3,58
	P2	23,30 ab	3,88	4,97 a	6,92	1,39 a	1495	10,00	3,23
	Sig.	*	-	*	-	*	-	-	-
2013	P0	21,63	3,49 a	5,60 b	5,81	1,55 c	1120	8,75	4,20
	P1	22,81	3,38 ab	6,36 ab	5,58	2,14 b	1135	9,00	3,09
	P2	22,95	3,29 b	7,05 a	5,16	3,17 a	1175	7,50	2,55
	Sig.	-	*	*	-	*	-	-	-
2014	P0	23,15	3,38 a	5,52 b	7,68 b	1,91	1563	8,00 ab	2,57
	P1	23,03	3,36 a	5,60 b	7,54 b	1,82	1538	8,50 a	2,34
	P2	22,78	3,25 b	7,08 a	8,82 a	2,16	1688	7,50 b	2,26
	Sig.	-	*	*	*	*	-	*	-
Media	P0	22,47	3,60	4,91	6,52	1,40	1395	9,17	3,22
	P1	23,18	3,59	5,49	6,57	1,63	1442	9,25	3,00
	P2	23,01	3,47	6,36	6,97	2,24	1453	8,33	2,68

Figura 1. Consecuencias de la aplicación de distintas dosis de riego en diferentes años (P0: seco, P1: riego a dosis baja y P2: riego a dosis media) en la producción, desarrollo vegetativo y composición de la uva de la variedad Cabernet Sauvignon en el valle del río Duero: (A) Madera de poda (kg), N° total de sarmientos y chupones/cepa, N° de racimos y rendimiento (kg)/cepa, peso de racimo y baya (g) y N° de bayas/racimo. (B) S.S.T.: Concentración de Sólidos Solubles totales (°Brix), pH, Acidez titulable (g ac. tartárico/L), Ácido tartárico y málico (g/L) e IPT: Índice de polifenoles totales. **Fuente:** Yuste et al., (2017).

Se debe tener en cuenta que no todas las variedades de vid presentan las mismas necesidades hídricas, respondiendo de diferente manera a distintos niveles de sequía, teniendo, por tanto, una capacidad de adaptación diversa según las peculiaridades de cada parcela (Santesteban et al., 2009).

1.1. Desafíos actuales de la viticultura

La viticultura, se enfrenta actualmente a grandes retos como el cambio climático, la sostenibilidad, la aparición de nuevas plagas y enfermedades, la escasez de recursos hídricos, etc. Estos desafíos condicionan y alteran la viticultura en particular y la producción agrícola en general, teniendo consecuencias en la rentabilidad (incremento de gastos de explotación), calidad y rendimiento de las cosechas.

La sostenibilidad actualmente tiene un papel fundamental y de gran relevancia ante las consecuencias del cambio climático. Según la Organización Internacional de la Viña y el

Vino (OIV), es una “estrategia global sobre los sistemas de producción y procesado de la uva, incorporando al mismo tiempo la sostenibilidad económica de estructuras y territorios, produciendo productos de calidad, limitando los riesgos para el medio ambiente, garantizando la seguridad de los productos y la salud de los consumidores, poniendo en valor el patrimonio histórico, cultural, ecológico y paisajístico” (OIV 2011).

Para la viticultura actual, la sostenibilidad es una gran preocupación debido al incremento de los insumos necesarios para el cultivo y a la variación de las condiciones climáticas. Por eso, los viticultores están empezando a modificar y mejorar las prácticas o estrategias empleadas en el viñedo para avanzar hacia una viticultura más sostenible. Los aspectos básicos en los que se enfocan actualmente son:

- **Reducción de pesticidas:** utilización de enemigos naturales, antagonistas de enfermedades, fitófagos, etc.; para fortalecer las capacidades de “autodefensa” de los sistemas agrícolas, aumentando la diversidad funcional del viñedo y su entorno.
- **Manejo del suelo:** asegurar unas condiciones de suelo más favorables para el crecimiento vegetal mejorando la actividad biológica del suelo, manejando adecuadamente el aporte de materia orgánica (Ejemplo: abonado orgánico con restos de procesado de uva), estableciendo coberturas de suelo (cubierta vegetal o acolchado) para evitar la erosión del suelo frente al viento o la lluvia, un laboreo de conservación, establecimiento de terrazas o cortavientos y el empleo de variedades mejor adaptadas a la zona.
- **Uso de energías renovables:** arriesgar por el uso de energías limpias y alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, procediendo de fuentes naturales inagotables y generando residuos de fácil tratamiento o eliminación.
- **Gestión hídrica:** utilizar sistemas de riego adecuados y de mayor eficiencia para un mejor aprovechamiento del agua, escogiendo los momentos óptimos para que el riego sea efectivo según la etapa de desarrollo del viñedo (Figura 2), ahorrando en costes y tiempo de trabajo.

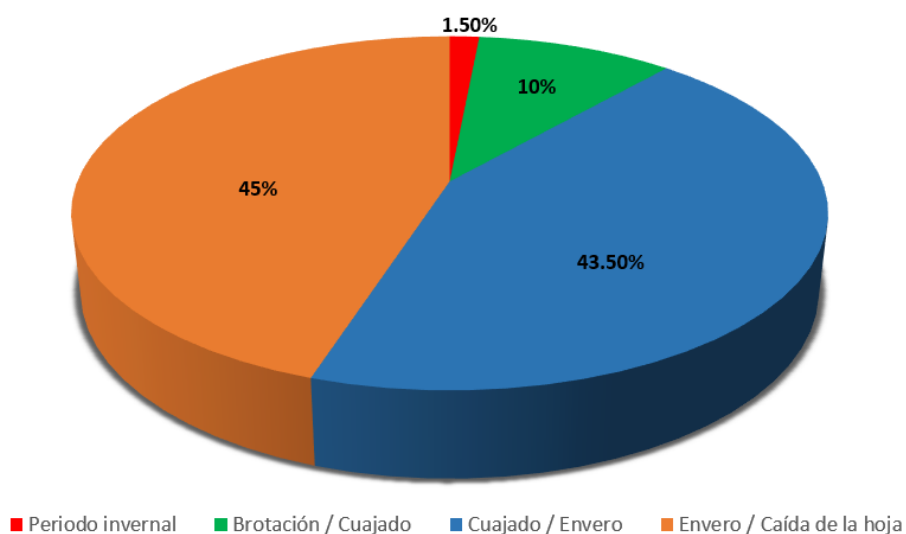


Figura 2. Distribución de las necesidades hídricas de la vid en el ciclo vegetativo. **Fuente:** Fernando Martínez de Toda. (2020). *El riego del viñedo*. Universidad de La Rioja.

1.1.1. Empleo del riego como herramienta de sostenibilidad

La adopción de una viticultura de regadío estaba prohibida o regulada estrictamente en muchas regiones vitivinícolas de Europa hasta hace algunos años. Actualmente, la superficie de regadío está aumentando de manera constante y un ejemplo claro es el de España, pasando de un 22,4% a un 41% desde el año 2004 hasta los últimos registros presentados en la Figura 3 (Diago 2022). Esto se debe a que una gran cantidad de viñedos se encuentran en regiones con una sequía estacional donde los déficits de agua tanto en el suelo como del agua atmosférica unido a altas temperaturas causan limitaciones en el rendimiento y la calidad. Durante los últimos años, los casos de estrés hídrico por sequía se han producido de una manera más frecuente e intensamente, siendo necesaria la incorporación de agua por riego para asegurar un rendimiento más predecible y regular (Chaves et al., 2007).



Figura 3. Evolución nacional de la superficie (hectáreas) de viñedo en regadío. **Fuente:** Estadísticas agrarias del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España (www.mapa.gob.es) - Superficies y producciones anuales de cultivos.

El objetivo del riego por lo tanto es el de compensar esos déficits hídricos y maximizar la calidad y rendimientos del fruto para aumentar los beneficios (Esteban et al., 2001). El consumo total de agua en un viñedo oscila entre 300 a 700 mm, siendo mucho más alto que la precipitación media anual de la gran mayoría de zonas vitícolas en general. Históricamente, la vid se ha cultivado en los países mediterráneos en condiciones de secano asociando la calidad tanto de la baya como la del vino a los años con más escasez de agua (Medrano et al., 2015). Tradicionalmente, el riego se manejaba para: no afectar al crecimiento normal del brote y el buen desarrollo de la superficie foliar durante el período de brotación, para un mejor control durante la etapa de floración y cuajado (abscisión de flores y frutos, división celular, tasa de cuajado, tamaño de las bayas), durante la maduración para asegurar la máxima cosecha y azúcares por hectárea (sin provocar un exceso de humedad (Ψ_b entre 0 y -0.2 MPa) o una restricción de agua muy severa ($\Psi_b < -0.8$ MPa)) y durante el periodo post-vendimia para aumentar la acumulación de compuestos fotoasimilados en los órganos de reservas (sarmientos, raíces y troncos) (Togores & Fernández-Cano 2011).

Sin duda alguna, el mayor uso del riego en el cultivo de la vid tiene un impacto directo en el rendimiento y la calidad como ya han demostrado diversos estudios, ya que los cambios en el estado hídrico de la vid en etapas fenológicas críticas tenían un efecto inmediato sobre el crecimiento vegetativo, el microclima de la parte aérea de la planta y en el metabolismo de las bayas (Ezzahouani *et al.*, 2007; Dry & Loveys 1998).

A continuación, se expondrán las desventajas de un uso inadecuado del riego en el viñedo:

- Cuando el aporte de agua se realiza en cantidades excesivas:
 - ✓ En cantidades excesivas pueden reducir el color y el contenido de azúcar y producir desequilibrios de acidez en el vino (Bravdo *et al.*, 1985; Esteban *et al.*, 2001).
 - ✓ También puede producir un exceso de vigor de los brotes, teniendo consecuencias indeseables en la composición de la baya, como una menor concentración de polifenoles y antocianos (McCarthy 1997).
 - ✓ Contribuye a aumentar la densidad de la parte aérea de la planta y, aumentando la sombra de los racimos (Smart *et al.*, 1990), siendo esto perjudicial para el desarrollo del color de las bayas, debido a que la radiación solar es un factor determinante para la formación de metabolitos secundarios (Crippen & Morrison 1986).
 - ✓ Un aumento excesivo de la producción, disminuyendo la calidad de la uva por un exceso de vigor que crea desequilibrios entre los órganos reproductivos y vegetativos (Esteban *et al.*, 2001; McCarthy 1997).

- Cuando el aporte de agua se realiza en cantidades menores a la cantidad de agua evapotranspirada por las plantas (Déficit hídrico):
 - ✓ Disminuye la apertura de estomas de las hojas como mecanismo de defensa de la planta para aliviar el estrés producido, reduciendo la absorción CO₂, disminuyendo la actividad fotosintética y aumentando la temperatura de sus hojas, al no producirse la regulación de temperatura por medio de la transpiración, alcanzando temperaturas de hasta 30 °C, disminuyendo la actividad fotosintética muy gravemente para la planta (Smart 1974).
 - ✓ Su desarrollo vegetativo se reduce, alcanzando una menor longitud y un menor número de brotes laterales, disminuyendo el tamaño y número de las hojas (superficie foliar expuesta y total).
 - ✓ Durante y después de la floración, puede reducir la producción debido a la abscisión y desecación de las flores o tener un impacto negativo en el volumen de las bayas más jóvenes (Hardie & Considine 1976; Ojeda *et al.*, 2001).

En la actualidad, el riego deficitario regulado (regulated deficit irrigation, RDI) y el secado parcial de la zona radicular (partial root drying, PRD) son las dos herramientas de mayor relevancia para mejorar la calidad de los vinos y disminuir la producción, teniendo efectos positivos en el color, sabor y aroma, al aumentar la proporción hollejo/pulpa (Ojeda et al., 2002; Chaves et al., 2007). El riego deficitario regulado elimina o reduce el aporte agua en determinados períodos del ciclo vegetativo, controlando la calidad y el vigor del viñedo (Dry et al., 2001).

Por otra parte, el secado parcial de la zona radicular es el que más recientemente se ha desarrollado, provocando que aproximadamente la mitad del sistema radicular se encuentre en un estado de sequía mientras que la otra mitad se mantenga regada (Chaves et al., 2007). Esto causa que las raíces del lado regado mantengan un estado hídrico adecuado y que las raíces deshidratadas sintetizen y envíen señales químicas que reduzcan la conductancia estomática para un ahorro del agua en la planta (Dry et al., 2000).

En un futuro no muy lejano, debido a la vulnerabilidad de los sistemas productivos en la viticultura actual frente al cambio climático y la disponibilidad de los recursos hídricos, los viticultores o agricultores de las regiones más secas, dependerán del riego de una manera notable para poder alcanzar un rendimiento y calidad dignos. Por ello, la gestión y conocimiento de los recursos hídricos o de los sistemas de riego serán claves para afrontar el reto de la sostenibilidad en la viticultura, afectando incluso a la supervivencia de cultivos en regiones con sequías estacionales.

La agricultura utiliza alrededor del 72% del total de agua dulce para el riego, aumentando su consumo en los últimos años y contribuye a la contaminación de aguas subterráneas y cursos de agua con fertilizantes y plaguicidas a consecuencia de la escorrentía. A estos problemas se puede unir la competencia por el uso de agua de sectores industriales o energéticos y que la calidad del agua empeore en determinadas regiones por una salinización, un agotamiento o por una mayor actividad contaminante. Todo esto causa un grave impacto ambiental para la producción de uva en los años venideros (Diago 2022).

Por ello la mejora de la gestión del agua en la viticultura es fundamental para reducir la creciente escasez a nivel mundial, además de reducir los elevados costes del riego al minimizar el uso de agua con el desarrollo de nuevos métodos de programación o control de mayor precisión. De forma breve, debemos realizar un seguimiento representativo y objetivo del estado hídrico de los cultivos para minimizar el uso del agua. Es muy importante concienciar y educar en este problema a los viticultores actuales y futuros, aportando herramientas que sean útiles y que contribuyan a una monitorización del estado hídrico y a realizar unas prácticas de riego con sistemas o tecnologías más precisos; e intentando que estas sean lo más asequibles económicamente para el pequeño y mediano viticultor (Diago 2022). Esto haría del riego una herramienta más sostenible frente al cambio climático, manejando el uso del agua en la viticultura con una mayor seguridad y fiabilidad para obtener una buena producción y calidad tanto de la uva como del vino a elaborar. La viticultura de precisión es la mejor vía para cumplir este objetivo, ya que se basa en conocer la distribución y variabilidad espacial dentro de cada parcela, aportando información de las condiciones hídricas por sectores para que nuestro riego sea lo más uniforme y eficiente posible.

1.1.2. Influencia del cambio climático

La climatología es uno de los factores más limitante para el éxito de una explotación agrícola, influyendo en la adaptación, producción y calidad de un cultivo y por lo tanto en la sostenibilidad económica de este (Jones & Alves 2012).

El cambio climático cada vez nos impone condiciones más cálidas en la cuenca mediterránea, siendo el sector vitivinícola uno de los más vulnerables al afectar las condiciones climáticas y ambientales a la fisiología y fenología de la vid, a la producción y a la calidad de la uva y por tanto a los vinos (Lasanta et al., 2022). En este contexto, ya se está notando la falta de agua para la producción agrícola debido a factores como el cambio en los patrones de precipitación o el aumento de la temperatura del aire, provocando posibles efectos perjudiciales como: pérdidas de humedad en el suelo que aumentan el riesgo de sufrir sequías más severas y frecuentes, un mayor riesgo de incendios, un aumento de lluvias torrenciales (Figura 4) o tormentas que provocan mayor erosión del suelo y mayor riesgo de sufrir daños y enfermedades en los cultivos, un aumento del grado alcohólico y de la variabilidad del viñedo, una disminución de la calidad, etc. (Lissarrague et al., 2012).

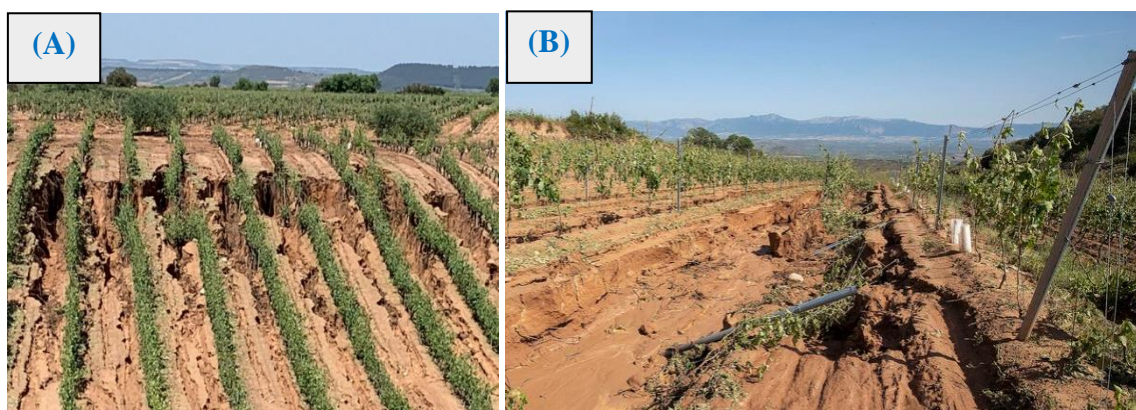


Figura 4. Daños ocasionados por lluvia torrencial en viñedos situados en Fuenmayor (La Rioja) en 2021: (A) Grave erosión del suelo en viñedo ubicado en una ladera. (B) Erosión del suelo, rotura de pámpanos y sistema de conducción quebrados. **Fuente:** (A) <https://nuevecuatrouno.com/>. (B) <https://www.eldiadelarioja.es/>.

Diversos estudios realizados en España indican que, si las emisiones de gases invernadero continúan a este ritmo elevado en la actualidad, no solo aumentarán las temperaturas, cambiarán los patrones de las precipitaciones y se producirán olas de calor, si no que tampoco se darán de una forma homogénea debido a la diversa topografía y geografía de la Península Ibérica, lo que dificultará mucho más la previsión y manejo de los cultivos por parte de los agricultores (Sánchez 2015). Aunque esta tendencia a ser más cálido de los climas en algunas regiones vitivinícolas ha permitido que produzcan en determinadas lugares vinos de mayor calidad (Jones & Alves 2012). Las tasas de calentamiento en la región vitivinícola de La Rioja observadas durante el período de crecimiento entre los años 1950 y 2014 (Diago et al., 2020) promedian un incremento de la temperatura media de entre 0,9 y 1,3 °C, disminuyendo la frecuencia de anticipo de los estados fenológicos y desplazando al término de la DOCa Rioja hacia una región más cálida (Índice de Winkler).

Ante esta situación, es necesario investigar y adoptar diversas estrategias que mitiguen los efectos del cambio climático, manteniendo vinos de alta calidad y tipicidad varietal para responder a las demandas actuales y futuras del mercado. Algunas de las estrategias son: los cambios de localización del viñedo hacia áreas de mayor altitud o con posibilidad de riego, modificaciones en el sistema de conducción de la cepa, nuevas técnicas de poda (poda tardía, poda mínima), elección de material vegetal adecuado, realizar una doble vendimia, mejorar la salud del suelo (acolchado, cubiertas vegetales), un riego tardío, una monitorización objetiva del déficit hídrico de una parcela para un riego más eficiente, etc. (Figura 5) (Diago et al., 2018; Martínez de Toda 2019; Diago et al., 2020; Lasanta et al., 2022).



Figura 5. Estrategias para mitigar los efectos del cambio climático: (A) Cubierta vegetal de cebada en viñedo situado en Rodezno (La Rioja). (B) Sistema de riego inteligente para viñedo. Fuente: (A) <https://www.riojalta.com/blog-noticias/post/cubierta-vegetal-en-el-vinedo/> (B) <https://brioagro.es/riego-inteligente-la-vina/>.

En el futuro, debido al descenso de las precipitaciones comentado anteriormente y que ya estamos padeciendo en determinadas regiones áridas, la disponibilidad de agua será el principal problema a resolver para no limitar el crecimiento y producción de la planta, dejando a un lado la calidad y luchando por la supervivencia del viticultor, ante una ya clara descompensación entre la madurez fenólica y tecnológica de las uvas. A consecuencia de esto, las áreas de regadío aumentarán, pero el uso de agua dulce virará de la agricultura a la industria y uso doméstico por una mayor demanda antropogénica (Elliott et al., 2014).

Siendo el riego uno de los elementos más importantes en la demanda antropogénica del agua, es necesario implementar sistemas de monitorización y riego de precisión para fomentar un uso sostenible del agua (Diago 2022).

Hoy en día, la gestión sostenible del agua de riego solo se puede llevar a cabo si se conoce de manera objetiva y representativa el estado hídrico del cultivo mediante el uso de técnicas y herramientas útiles para viticultores. Para ello, es necesario adoptar tecnologías de monitorización y riego más modernas, eficientes, fáciles de manejar y económicas (Chartzoulakis & Bertaki 2015).

1.2. Métodos para la medición del estado hídrico de la vid

Existen varios métodos que evalúan el estado hídrico del viñedo, unos se basan en el cálculo de la demanda atmosférica, otros en la medida de evapotranspiración de la planta o de la humedad del suelo y por último los basados en la medición directa de la planta (Jones et al., 2004). También existen métodos basados en las respuestas fisiológicas de la planta ante un déficit hídrico, midiendo la conductancia estomática (g_s), la turgencia de la hoja, variaciones en el diámetro del tallo o el flujo de savia. Tradicionalmente, el método más usado es el de evaluar el estado hídrico de la planta por medición directa del potencial hídrico en hoja (Ψ_l) o tallo (Ψ_{stem}) (Diago et al., 2017).

A continuación, se detallarán los métodos convencionales para medir el estado hídrico del viñedo, mencionando sus limitaciones o desventajas en su uso, y se describirán los nuevos métodos no invasivos que existen en la actualidad.

1.2.1. Métodos convencionales:

Los métodos clásicos o convencionales requieren de una gran cantidad de trabajo y tiempo para la adquisición de datos y la obtención de información sobre el potencial hídrico (ej. cámara de Schölander). Algunas son técnicas destructivas que no obtienen tampoco una gran cantidad de datos, por lo que a veces no evalúan la variabilidad del estado hídrico del viñedo, otorgando una información sesgada de las necesidades de riego reales de toda la parcela (Diago et al., 2018). En este apartado, se describen los principales métodos utilizados en la viticultura.

1.2.1.1. Métodos basados en la demanda atmosférica

Este método mide la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Está condicionado por la temperatura y humedad del aire, por lo que su medición dependerá de factores meteorológicos (Humedad relativa, radiación solar, viento, temperatura del aire) atmosféricos (presión atmosférica) y propios del cultivo (tipo, variedad, fase del ciclo vegetativo).

La evapotranspiración del cultivo y por tanto las necesidades hídricas de este, se puede calcular de dos formas:

- 1) Cálculo de la evapotranspiración potencial (ET_c): Es el más sencillo, calculando la evapotranspiración del cultivo por medio del producto entre la evapotranspiración de referencia (ET₀) que se puede obtener de diferentes estaciones meteorológicas, y el coeficiente de cultivo (K_c). El K_c varía según el tipo de cultivo y su etapa de desarrollo, utilizando valores estandarizados para cuatro etapas durante el crecimiento del cultivo (etapa inicial, etapa de desarrollo, etapa mediados de temporada y etapa final). La ecuación utilizada es la siguiente:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

Donde:

ET _c	evapotranspiración del cultivo (mm/día)
K _c	coeficiente del cultivo
ET ₀	evapotranspiración de referencia (mm/día)

- 2) Método de Penmann-Monteith: es el método más utilizado. Calcula la evapotranspiración del cultivo de referencia. Requiere de la obtención de mayor número de datos que el anterior como: radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Con este método se puede comparar la evapotranspiración de distintas regiones o períodos del año y relacionarlos con la evapotranspiración de otros cultivos, siendo más preciso que el anterior. Su ecuación es la siguiente:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

ET ₀	evapotranspiración de referencia (mm/día)
R _n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m ² ×día)
R _a	radiación extraterrestre (mm/día)
G	flujo del calor de suelo (MJ/m ² ×día)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u ₂	velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
e _s	presión de vapor de saturación (kPa)
e _a	presión real de vapor (kPa)
e _s - e _a	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)
γ	constante psicrométrica (kPa/°C)

El procedimiento de ambos métodos se describe en el “Estudio de riego y drenaje 56” de la FAO (Pereira et al., 2015).

1.2.1.2. Métodos basados en la determinación de la humedad del suelo

El contenido de agua en el suelo se puede determinar por distintos métodos, realizando la medición de la humedad del suelo de una forma directa o indirecta. La elección de uno u otro método dependerá del fin con el que se realiza esta determinación, el personal, la superficie a estudiar, la frecuencia de medición o el equipamiento (Angella et al., 2016). También, otra clasificación posible sería la de métodos volumétricos, destinados a determinar el porcentaje de agua en un volumen de suelo concreto o métodos tensiométricos, que miden la fuerza de retención del agua en el suelo (Diago 2022).

- **Métodos indirectos:** miden alguna característica asociada al contenido de humedad en el suelo.
 - a) **Sensores de capacitancia:** mide la humedad del suelo según los cambios que se produzcan en su constante dieléctrica. La constante dieléctrica es una propiedad macroscópica que define la polaridad de una sustancia y por tanto la capacidad de esta para acumular carga eléctrica o energía. Este parámetro para la mayoría de los materiales presentes en suelo es muy pequeño, oscilando entre 2 y 4; pero todo lo contrario ocurre con la constante dieléctrica del agua que es de 80.

Por ello, este método nos indica que a medida que la constante dieléctrica aumente, también lo hará el contenido hídrico del suelo. Para llevar a cabo esta práctica, se utiliza una sonda con una cierta frecuencia de resonancia, que tiene dos electrodos que crean un campo eléctrico que penetra en el suelo (Figura 6). A medida que la resonancia se eleva también lo hace la humedad del suelo, obteniendo este dato por medio de una unidad de control que correlaciona ambos parámetros (Angella et al., 2016).

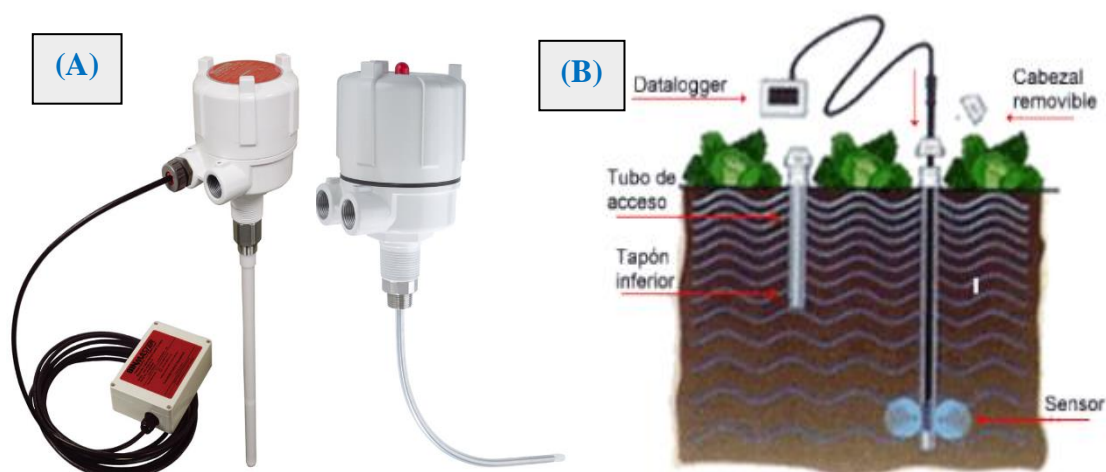


Figura 6. Sensores de capacitancia: (A) Sondas de capacitancia BinMaster®. (B) Esquema equipo de medida de la capacitancia del suelo mediante dos electrodos separados. **Fuente:** (A) <https://www.binmaster.com/es/products/category/capacitance-probes>. (B) Angella et al., (2016).

- b) Dispersión de neutrones: con este método se emiten neutrones por medio de una sonda que penetran y chocan con los núcleos de otros elementos presentes en el suelo produciendo una desaceleración en el flujo de neutrones. Como cada elemento requiere de una cierta cantidad de choques para que se produzca la desaceleración, se utiliza el hidrógeno al ser el agua la única fuente de este elemento y por ser este el desacelerador más rápido y eficiente. El equipo consta de una sonda tubular, un emisor y receptor de radiación neutrónica unido a un contador (Figura 7). Por ello, el número de neutrones desacelerados que capta el detector es directamente proporcional a la cantidad de agua que presente ese suelo (Angella et al., 2016).

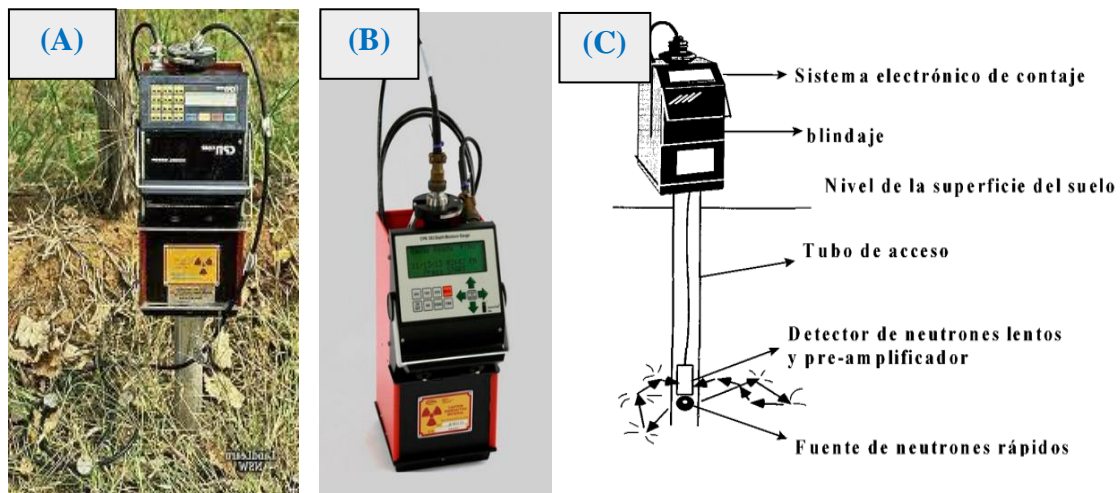


Figura 7. Dispersión de neutrones: (A) Sonda de neutrones “NEUTRON SMART 503 ICT INTERNATIONAL”. (B) Sonda de neutrones CPN 503DR Hydroprobe. (C) Esquema de una sonda de neutrones para la medición del contenido hídrico en el suelo. **Fuente:** (A) http://riteca.gobex.es/en/catalogo_infraestructuras/. (B) <https://www.htsperu.com.pe/medidor-de-calidad-de-agua/instrumentos-para-monitoreo-de-suelos/sensores-de-humedad-de-suelo/sonda-neutron-smart-503-ict-international?search=neutron> (C) Ulloa (2013).

A continuación, se citan los dos métodos basados en la medida del potencial hídrico del suelo, es decir, la fuerza con la que el agua es retenida. A menor contenido hídrico del suelo mayor será el potencial hídrico total, expresándose este esfuerzo de extracción en unidades de presión (kilo Pascal, bar o atmósfera). Normalmente con estos métodos se mide el potencial matricial, que es el de mayor importancia desde el punto de vista agronómico, aunque en suelos salinos el que cobra importancia es el potencial osmótico. (Angella et al., 2016).

- c) Medición del potencial matricial: el potencial matricial refleja las fuerzas de atracción del agua ejercidas por las partículas sólidas del suelo y por las propias moléculas del agua. Para llevar a cabo este método es necesario el uso de un tensiómetro (Figura 8 (B)) que se introduce en el suelo a la profundidad deseada. El tensiómetro tiene una cápsula de cerámica o porcelana porosa que está conectada por medio de un tubo lleno de agua destilada a un vacuómetro o manómetro de vacío, cerrando herméticamente el tubo (Figura 8 (A)) (Togores & Fernández-Cano 2011).

La función de este aparato es la de equilibrarse con el potencial hídrico del suelo, de manera que, si este se seca, succiona el agua de la cápsula o bien en el caso estar humedecido por el riego o una precipitación, el agua fluye de nuevo a la cápsula. El rango de medición adecuado para controlar suelos regados oscila entre 0 y 0,8 bares, valores menores aportan lecturas erróneas por la formación de burbujas en la columna (Angella et al., 2016).

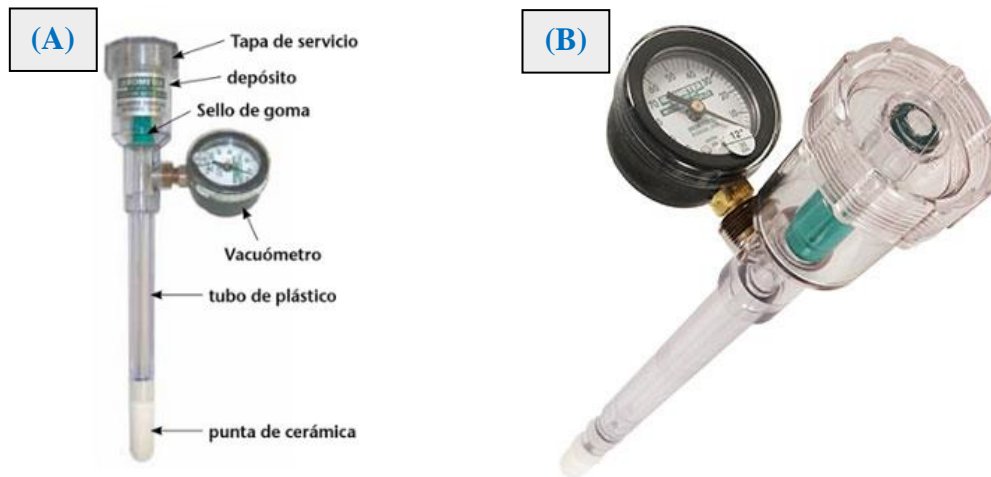


Figura 8. Medición del potencial matricial: (A) Detalle de las partes de un tensiómetro. (B) Tensiómetro “IRROMETER”. **Fuente:** (A) <https://www.reyesgutierrez.com/el-mango-kent/>. (B) <https://www.traxco.es/tienda/tensioometro-de-humedad/>.

- d) Medición de resistencia eléctrica: se instala en el suelo un sensor con dos electrodos englobados en un bloque poroso (ej. Yeso) que miden la resistencia eléctrica de este (Figura 9). Estos dos electrodos transmiten una corriente eléctrica que varía según el potencial hídrico del suelo, de manera que cuanto menor resistencia se ejerza para transmitir esa corriente eléctrica mayor será la humedad del bloque introducido, y por lo tanto mayor será el contenido de agua de ese suelo (Angella et al., 2016).



Figura 9. Equipo Watermark para medir el potencial hídrico del suelo mediante resistencia eléctrica. **Fuente:** <https://www.parsros.net/urun/watermark-dijital-toprak-nem-sensoru-ve-dijital-metre/>.

▪ **Métodos directos:**

- a) Método gravimétrico: es el método oficial de referencia que estima el contenido de agua de un suelo mediante la determinación del peso del agua contenido en una muestra de suelo. Para realizar esto, se toma una muestra de suelo de la parcela o zona a analizar, se pesa en una báscula de precisión, después se introduce en una estufa a 110 °C durante 24-48 horas hasta que el suelo pierda totalmente su humedad y se vuelve a pesar (Angella et al., 2016).

El contenido de agua de ese suelo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\theta_g = \frac{\text{Peso del suelo húmedo} - \text{Peso del suelo seco}}{\text{Peso del suelo seco}} \times 100$$

Donde:

θ_g porcentaje gravimétrico de agua

1.2.1.3. Métodos basados en la medida directa de la planta

Estos métodos se basan en las respuestas fisiológicas de la planta ante un estado hídrico adecuado, desmesurado o deficitario, utilizando al cultivo como un biosensor. Los métodos empleados para conocer el estado hídrico del viñedo son los siguientes:

- a) Dendrometría: este método utiliza un dendrómetro que mide las oscilaciones del diámetro del tronco como consecuencia de la contracción y dilatación de los tejidos del tronco por la transpiración de la planta según el estado hídrico en el que se encuentre durante el día y la noche. Cuanto mayores son las oscilaciones del tronco mayor estrés hídrico está sufriendo la planta (Jones 2004). Para vides jóvenes o que se encuentran en una fase rápida de crecimiento, se utiliza la tasa máxima de crecimiento del tallo (shoot growth rate, SGR); mientras que, para vides con mayor edad, el indicador más adecuado es la contracción máxima diaria (máximum daily shrinkage, MDS) (Fernández 2014).

Los dendrómetros se instalan en lado del tronco opuesto a la trayectoria del sol (Figura 10 (A)) para disminuir la dilatación por el efecto de calentamiento de la radiación solar directa. Deben estar a cierta distancia del suelo para evitar interferencias por la maleza y siempre en contacto con la superficie del tronco para evitar impactos por la maquinaria o el agua de lluvia (Fernández 2014).

- b) Medición del flujo de savia: la savia transportada por el xilema desde las raíces hasta las hojas está compuesta principalmente de agua con otros elementos en disolución (elementos minerales, reguladores de crecimiento, etc.). El flujo de savia mide el movimiento de esa agua y solutos a través de la planta producido por la evapotranspiración de la parte aérea (Jones 2004).

La velocidad del flujo de savia estará condicionada por el estado hídrico de la planta, ya que, a mayor estrés hídrico, menor evapotranspiración por el cierre de estomas y, por lo tanto, una menor velocidad de la savia hasta la parte aérea. La velocidad del flujo de savia se mide mediante sensores instalados en la planta que aplican calor de forma constante en la proximidad a la corriente de savia bruta (Figura 10 (B) y 10 (C)) (Jones 2004).

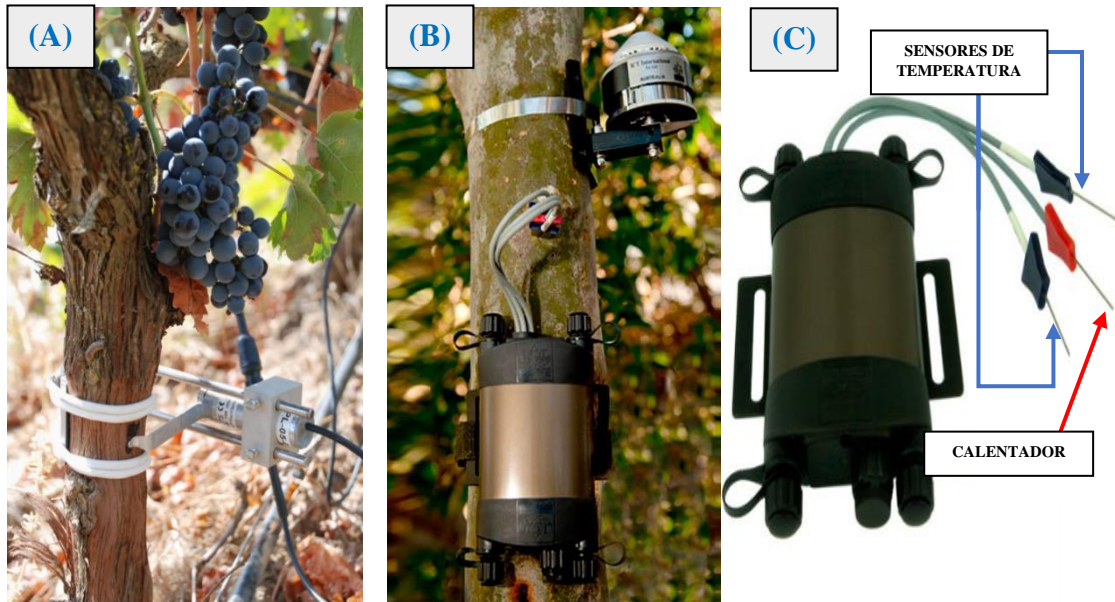


Figura 10. (A) Dendrómetro instalado en tronco de vid. (B) Sensor de flujo de savia instalado en tronco de frutal. (C) Partes de un sensor de flujo de savia. **Fuente:** (A) <https://eiccontrols.com/es/inicio/519-dendrometro-para-plantas.html/>. (B) <https://www.ambimet-instrumentacion.cl/producto/medidor-de-flujo-de-savia-sfm1-x-sap-flow-meter/>. (C) <https://www.htsperu.com.pe/medidor-de-calidad-de-agua/instrumentos-para-monitoreo-de-plantas/medidores-de-flujo-de-savia/metodo-de-compensacion-del-metodo-de-pulso-de-calor-chpm-ict-international/>.

- c) Medición de la conductancia estomática (g_s): la conductancia o transpiración estomática es el regulador del intercambio de gases entre la hoja (CO_2 y vapor de agua) y el aire que les rodea. Debido a esto, tiene un papel fundamental en la planta como defensa frente a la pérdida de agua, cerrando o abriendo los estomas según el estado hídrico en el que se encuentre. Por lo tanto, cuanto mayor el estrés hídrico, menor será el valor de la conductancia estomática por un cierre de estomas para evitar las pérdidas de agua por transpiración (Jones 2004).

Las herramientas utilizadas para este método son:

- Medidor de intercambio de gases: para su utilización, se escogen las hojas de la zona media de la cepa, presentando estas una buena exposición al sol y un estado saludable; se coloca la hoja dentro de la cámara, se cierra dicha cámara y se presiona hasta que el aparato muestre la lectura (Figura 11 (B)).
- Porómetro de hoja: mide la presión y flujo de vapor sobre la superficie de la hoja. Este aparato tiene una pinza que se fija a la hoja midiendo la presión entre dos puntos de la misma trayectoria, calculando el flujo y gradiente de vapor con las medidas de presión y conductancia (Figura 11 (A)).

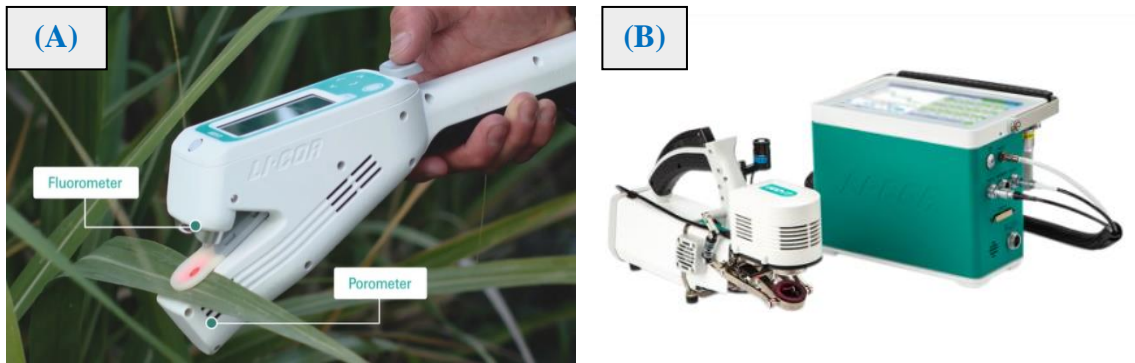


Figura 11. Medición de la conductancia estomática: (A) Porómetro y fluorímetro LICOR modelo LI-600 tomando medida en hoja. (B) Medidor portátil de intercambio de gases LICOR modelo LI-6800 utilizado también como medidor de fotosíntesis. **Fuente:** (A y B) <https://www.licor.com/>.

d) Medición del potencial hídrico (Ψ): estima la aparición de déficits hídricos en el sistema suelo-planta-atmósfera, basándose en la tensión del agua transportada a través del xilema de la planta.

El método más utilizado por su precisión y rapidez a la hora de medir el potencial hídrico de la planta es la cámara de presión de Schölander. Con esta herramienta, se puede medir el potencial hídrico de hoja (Ψ_I), el de tallo (Ψ_{stem}) y el potencial hídrico antes del amanecer en ambos órganos (Ψ_{PD}), aunque tiene menor poder discriminante el de la hoja (Santesteban et al., 2019). La utilización de la cámara de presión de Schölander puede tener dos tipos de procedimientos según el potencial hídrico que queramos obtener:

- Para medir el Ψ_I : se corta una hoja adulta, se coloca dicha hoja en la tapa de la cámara de presión de manera que solo sobresalga el peciolo, se cierra herméticamente la cámara y se genera presión en el interior de la cámara con un gas inerte (ej. Nitrógeno) lentamente. Cuando comience a aparecer humedad en la zona de corte del peciolo, la presión generada en la cámara equivaldrá a la tensión del agua en esa hoja. A mayor tensión, mayor estrés hídrico (Diago 2022).
- Para medir el Ψ_{stem} : se recoge la hoja en una bolsa de plástico de aluminio para disminuir su temperatura y transpiración. Pasadas unas horas, se alcanza el equilibrio entre el potencial hídrico de la hoja de la bolsa y el potencial hídrico del tallo de la planta. Este método es mucho más cómodo y discriminante al poder realizarse la medición tanto al amanecer como durante el resto del día (Diago 2022).

En la siguiente Figura 12 se muestra una cámara de presión de Schölander empleada para prácticas de laboratorio (Figura 12 (A)) y una cámara de presión de Schölander portátil utilizada para mediciones en campo (Figura 12 (B)).



Figura 12. Medición del Ψ : (A) Cámara de presión en laboratorio de la Universidad de La Rioja. (B) Cámara de Schölander portátil que necesita de una bomba externa de aire comprimido para su funcionamiento. **Fuente:** (A) Rafael Tomás Las Heras. (2019). *Práctica 6. Determinación del estado hídrico de la vid.* Universidad de La Rioja. (B) <https://coltein.com/>.

- e) Discriminación por isótopos de carbono: este método se basa en la preferencia de las enzimas responsables de la fotosíntesis (ej. Rubisco) de la planta por el isótopo ^{12}C predominante en la atmósfera, frente al isótopo ^{13}C . Se utiliza durante la etapa de maduración de las bayas, ya que, en condiciones de estrés hídrico, esta preferencia es menos marcada, porque los azúcares producidos por las plantas contienen en mayor cantidad el isótopo ^{13}C (Diago 2022; Escalona et al., 2014).

1.2.1.4. Ventajas y desventajas de los métodos convencionales

De todos los métodos mencionados anteriormente para la medición del estado hídrico de una explotación agrícola, tanto en suelo como en planta, tienen diferentes ventajas o limitaciones de las que se debe tener conocimiento para la elección de los mismos o de otros métodos alternativos. En este apartado se exponen esas diferentes ventajas e inconvenientes.

En primer lugar, **los métodos basados en la demanda atmosférica** (Cálculo de ET_0 y Método de Penman-Monteith) son de fácil y sencilla aplicación para indicar la cantidad de agua a aplicar en el viñedo. No obstante, estos métodos no son lo suficientemente robustos y precisos como los utilizados para la medición en suelo y planta, ya que su cálculo se realiza normalmente de una forma muy generalizada, estando condicionado por diferentes factores meteorológicos (temperatura, radiación, viento, etc.) y por el tipo de cultivo. Debido a estos condicionantes, se deben realizar estimaciones muy precisas del K_c y de la evapotranspiración, ya que en relación al último parámetro está comprobado que las contribuciones de la transpiración de la vid, la transpiración de la cubierta vegetal o la evaporación del suelo varían según el ciclo de crecimiento, repercutiendo esto en el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo. Por eso son métodos que requieren de una calibración con otros métodos basados en plantas, ya que presentan errores acumulativos que necesitan de una recalibración de manera regular (Diago 2022).

Tabla 2: Resumen de las principales ventajas e inconvenientes de los métodos basados en la demanda atmosférica.

Métodos	Ventajas	Inconvenientes
<p>Cálculo ET₀</p> <p>Penmann-Monteith</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fácil aplicación ✓ Indican la cantidad de agua a aplicar en el cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Falta de precisión y datos muy generalizados ✗ Condicionado por factores meteorológicos y el tipo de cultivo, requiriendo de estimaciones muy precisas (Kc y ET₀) ✗ Recalibraciones necesarias con otros métodos por errores acumulativos

Por otra parte, los **métodos basados en la determinación de la humedad del suelo** ya sean indirectos o directos, presentan facilidad para su aplicación y automatización en condiciones de campo, teniendo bastante precisión y pudiendo manejarlos mediante control remoto. Otra ventaja de estos métodos es la facilidad de obtener esta tecnología mediante casas comerciales, ofreciendo una gran variedad de sensores y precios. También, estos sensores, tienen una gran capacidad de producir datos en continuo en diferentes épocas del ciclo vegetativo (incluido en invierno), beneficiando la gestión del riego del viticultor a lo largo del año (Diago 2022).

La principal desventaja de estos métodos es la variabilidad que presenta el suelo dentro de una misma parcela, siendo esencial la adquisición de varios sensores para una adecuada monitorización del estado hídrico, aumentando el tiempo de trabajo y el coste económico. La instalación de estos sensores no se puede llevar a cabo en suelos con mucha pedregosidad y grava. A este problema de instalación, también se le une el inconveniente que presenta para el laboreo y el paso de maquinaria, dificultando las necesarias operaciones en campo y suponiendo un gran riesgo para los sensores de sufrir daños. También, para la utilización de estos métodos se necesita de una formación y habilidad cualificada del trabajador, ya que para alguno de estos métodos (ej. Dispersión de neutrones) es imprescindible realizar una calibración previa y son equipos bastante pesados (Angella et al., 2016; Diago 2022).

Otra desventaja es el volumen de suelo que estudian. Se sabe que las raíces de la vid pueden explorar más del límite vertical y horizontal de suelo que estudian estos métodos, por lo que la lectura de la disponibilidad de agua para la planta no será del todo adecuada. Ante este problema, surgieron una serie de sondas portátiles que se insertaban en tubos previamente instalados a la profundidad deseada en diferentes ubicaciones de la parcela. Pero estas sondas portátiles tienen como inconvenientes el elevado coste de instalación y adquisición, y su difícil automatización, limitando la utilización de estas para el viticultor (Diago 2022).

Tabla 3: Resumen de las principales ventajas e inconvenientes de los métodos basados en la determinación de la humedad del suelo.

Métodos	Ventajas	Inconvenientes
<p>Directos</p> <p>Gravimétrico</p>	<p>✓ Fácil aplicación, manejo y automatización en campo</p> <p>✓ Precisos</p>	<p>✗ Variabilidad del suelo en la parcela</p> <p>↓</p>
<p>Indirectos</p> <p>Capacitancia</p> <p>Dispersión de neutrones</p> <p>Resistencia eléctrica</p> <p>Potencial matricial</p>	<p>✓ Indican la cantidad de agua a aplicar</p> <p>✓ Producen datos en continuo en diferentes épocas del ciclo vegetativo</p> <p>✓ Gran disponibilidad y variedad de sensores por distintas casas comerciales</p>	<p>✗ Se necesita un gran nº de sensores para una adecuada monitorización (↑ coste y tiempo)</p> <p>✗ Problemas con su instalación (Riesgo de daños, dificultad manejo maquinaria, suelos pedregosos)</p> <p>✗ Equipos bastante pesados y con limitación del volumen de suelo estudiado</p> <p>✗ Calibraciones previas</p> <p>✗ Formación cualificada del trabajador</p>

Por último, se exponen las ventajas y desventajas de los **métodos basados en la medición directa en planta**. Estos métodos se han descrito como los más adecuados para la evaluación del estado hídrico de la vid y por ello son los más utilizados (Jones 2004).

- **Dendrometría:** las ventajas de este método son: la posibilidad de su automatización, pudiendo obtener datos de forma continua, su capacidad de detección temprana de estrés hídrico por muy leve que se produzca.

Por el contrario, sus inconvenientes son: la instalación puntual en un número limitado de cepas, su minuciosa calibración antes de su instalación, especial atención en su mantenimiento y en algunos trabajos se ha estudiado que las variaciones en el diámetro del tronco pueden deberse a causas diferentes al estrés hídrico como la edad, tamaño, carga o patrones de crecimiento estacional; dificultando la interpretación de los datos recogidos y por tanto el cálculo de las dosis de riego (Ortuño et al., 2010; (Diago 2022).

- **Medición del flujo de savia:** la principal ventaja de estos métodos es la capacidad de realizar mediciones continuas a largo plazo. El método más utilizado, el de Balance de calor del tallo, es un método no destructivo, aunque hay otros que si lo son (Ferreira et al., 2008; Diago 2022).

Las desventajas de este método son: instalación en un número limitado de cepas, requiere de una gran cantidad de instrumentación, de una calibración para cada sensor y de un trabajador con conocimientos técnicos cualificados para la interpretación de los datos recogidos. Esto último es muy importante, ya que algunos autores indican que los cambios en el flujo de savia provocados por un cambio en la tasa de transpiración de la planta por el cierre de estomas pueden estar influenciado por otras condiciones ambientales (ej. Humedad) y no solo por el estrés hídrico, ya que solo se estiman cambios en la conductancia estomática (Jones 2004).

- Medición de la conductancia estomática: como principal ventaja es la sensibilidad de este método al déficit hídrico. Sus desventajas por otra parte son: gran variación en los datos recogidos de una hoja a otra por diferencias entre sus temperaturas, requiriendo de un gran número de repeticiones y calibraciones para obtener datos fiables, haciendo a este método muy laborioso y de difícil automatización.

Haciendo relación a los aparatos que se pueden utilizar por medio de este método, concretamente; los porómetros y los medidores de intercambio de gases, se puede decir que: los porómetros son más fáciles en cuanto su manejo y mantenimiento, más rápidos y menos caros que los medidores, pero los medidores proporcionan datos más fiables (Jones 2004; Diago 2022).

- Medición del potencial hídrico Ψ (Cámara de Schölander): es la técnica más útil y de referencia para estimar el estado hídrico de la planta debido a su precisión a la hora de medir el potencia hídrico ya sea en hoja (Ψ_L) o en tallo (Ψ_S). Las desventajas de este método son: lentitud en la toma de muestras y medición, es muy laborioso, de inadecuada automatización, la medición se debe realizar de forma manual, el momento del día para la recogida de muestras, gran cantidad de mano de obra y poco funcional para grandes superficies de viñedo (Jones 2004; Diago 2022).
- Discriminación por isótopos de carbono: como principal ventaja es la utilización de este método como un buen indicador del estado hídrico del cultivo durante el proceso de maduración. Por otra parte, las desventajas de este método son: la variación de la cantidad de isótopo ^{13}C según la variedad o portainjerto y su limitación de uso en otras etapas del ciclo vegetativo de la vid, haciendo difícil la gestión del riego del día a día (Diago 2022; Escalona et al., 2014).

Hay otros sensores especializados que miden la cavitación del xilema, es decir; las ondas acústicas generadas cuando se fracturan las columnas de agua del xilema por un déficit hídrico. Aunque este método es muy sensible al aumento del estrés hídrico, la principal desventaja es que la mayoría de las cavitaciones ocurren durante la etapa de secado de la planta, siendo poco útil para otros momentos del ciclo de la vid cuando la planta presenta un excesivo contenido hídrico que puede afectar a la calidad de la producción (Jones 2004).

Tabla 4: Resumen de las principales ventajas e inconvenientes de los métodos basados en la medición directa en planta.

Métodos	Ventajas	Inconvenientes
Dendrometría	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Alta precisión 	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Instalación en un nº limitado de plantas
Flujo de savia	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Detección temprana de estrés hídrico 	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Minuciosa calibración y mantenimiento
Conductancia estomática	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Mediciones continuas (Flujo de savia / Dendrometría) 	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Difícil automatización
Cámara de Schölander	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Buen indicador del estado hídrico en maduración (Discriminación por isótopos de carbono) 	<ul style="list-style-type: none"> ☒ Lentitud en la toma de muestras
Discriminación por isótopos de carbono		<ul style="list-style-type: none"> ☒ Poco práctico para grandes superficies con una alta variabilidad espacial ☒ Gran cantidad de mano de obra cualificada ☒ Variaciones en resultados por condiciones diferentes al estrés hídrico (Humedad, Tª hoja, variedad, etc.)

En resumen, aunque todos estos métodos tienen una gran fiabilidad y adquieren una información valiosa sobre el estado hídrico del viñedo, son métodos generalmente destructivos, de compleja utilización o manejo, exigentes en tiempo y trabajo, algunos de ellos solo miden un número limitado de plantas y son de difícil o imposible automatización (Diago et al., 2017; Diago et al., 2018).

Por eso, es fundamental el desarrollo e investigación de nuevos métodos no destructivos, fiables, rápidos, adecuados para la variabilidad espacial del viñedo y por lo tanto automatizados, de fácil manejo, utilización e interpretación, que realicen mediciones continuas de un número ilimitado o elevado de plantas y que sean razonablemente económicos. El desarrollo de estos nuevos métodos nos facilitará el conocimiento del estado hídrico del viñedo, otorgándonos la capacidad de gestionar el riego de una manera más eficiente y económica (Fernández 2014; Jones 2004).

1.2.2. Nuevos métodos de medida no invasivos:

Ante la mayoría de los inconvenientes de los métodos tradicionales, se están desarrollando e investigando alternativas automatizadas basadas en tecnologías no destructivas para evaluar el estado hídrico del viñedo. Estos nuevos métodos no invasivos son más avanzados, permitiendo estrategias más inteligentes y eficientes de riego. Sin embargo, aunque algunos estén disponibles comercialmente, otros todavía se encuentran en desarrollo o no se han adoptado ampliamente (Fernández-Novales et al., 2021).

La principal ventaja que presentan estos métodos aparte de ser no destructivos y rápidos en la toma de datos es que pueden caracterizar la variabilidad espacial en el viñedo (toma de gran cantidad de datos). Aunque la variabilidad de los suelos, características topográficas y factores meteorológicos (temperatura, precipitaciones, viento, radiación solar) ejercen una fuerte influencia en el cultivo, muchos agricultores, optan por realizar prácticas vitícolas muy uniformes (ej. Dosis de fertilización, abonado o tratamientos fitosanitarios). Dichas prácticas provocan que la sostenibilidad, producción y calidad del cultivo disminuyan, siendo un grave problema en un sector tan competitivo como el vitivinícola. La viticultura de precisión afronta este problema, gestionando los viñedos según la variabilidad temporal y espacial que estos presenten al desarrollar e implementar nuevos métodos de medida. De esta forma, se podrá adaptar y ajustar de una forma más eficiente la disponibilidad de agua y nutrientes dentro de las parcelas, obteniendo un mayor equilibrio entre lo económico, social y ecológico (Diago 2022; Jones 2004).

Los nuevos métodos de medida en la viticultura de precisión realizan detecciones remotas y próximas recopilando información sobre las plantas y el suelo mediante sensores manuales o sensores incorporados en plataformas (postes, vehículos terrestres, satélites, drones, avionetas, etc.). La mayoría de estas nuevas tecnologías tienen un funcionamiento basado en la interacción entre la radiación electromagnética en un determinado órgano o tejido vegetal a diferentes rangos de longitud de onda del espectro electromagnético (ultravioleta, espectro visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo lejano) (Figura 13). Esta radiación puede emitirse por el sol o por una fuente de luz interna, pudiendo detectar con un sensor pasivo o activo la radiación reflejada o absorbida (Diago 2022; Jones 2004.)

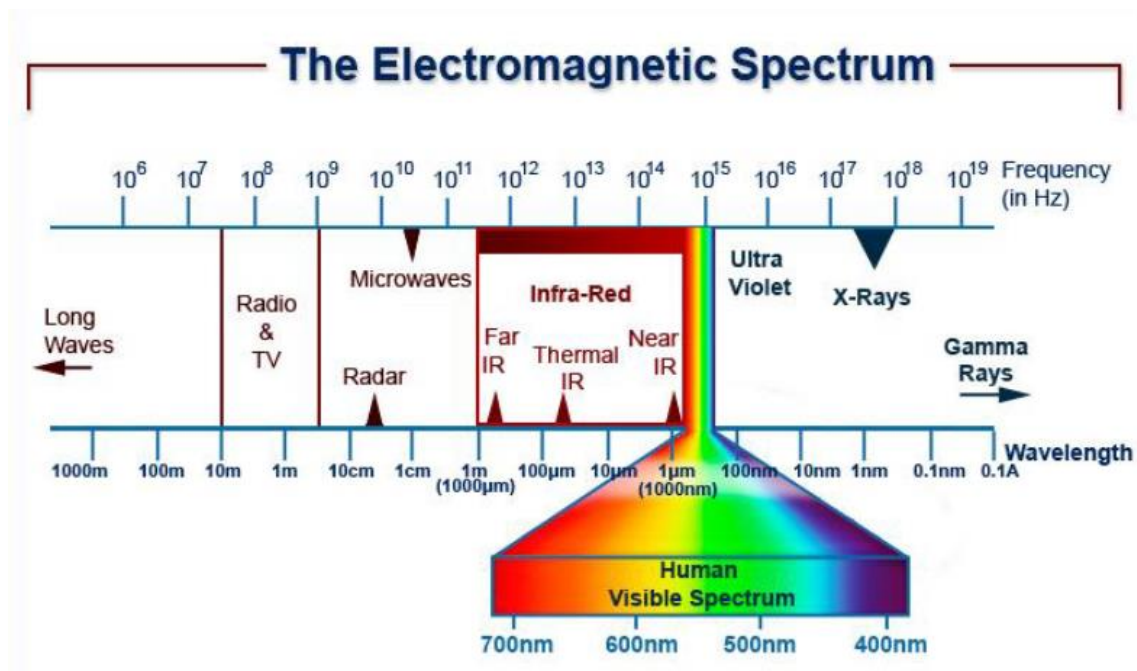


Figura 13. Imagen del espectro electromagnético mostrando las regiones de interés que estudian las nuevas tecnologías: espectro visible (390-750), infrarrojo cercano (750-1300 nm) e infrarrojo de onda corta (1300-2500 nm). **Fuente:** Javier Tardáguila Laso. (2021). *Tecnologías-Sensores-Plataformas*. Universidad de La Rioja.

Para la evaluación del estado hídrico de la vid, se están desarrollando metodologías basadas en dos tecnologías, la termografía y la espectroscopía VIS-NIR. Ambas tecnologías recopilan datos e información apoyándose en un método de referencia basado en plantas (ej. Ψ o g_s) (Diago 2022).

1.2.2.1. Termografía

Es una tecnología que mide la radiación infrarroja emitida por uno o varios objetos, mediante cámaras termográficas (Figura 14), convirtiendo los valores obtenidos en imágenes visibles (Figura 15) que muestran la variabilidad de temperatura del objeto u objetos fotografiados. Esta tecnología permite la visualización de la temperatura superficial dentro del rango de longitud de onda de 1,3 a 15 μm del espectro electromagnético (Jones & Grant 2015; Diago 2022).

En agricultura, el uso principal de esta tecnología es la evaluación del estado hídrico de la planta, basándose en el principio fisiológico de la apertura y cierre estomático de la hoja. Cuando la hoja transpira, la pérdida de vapor de agua a través de los estomas produce una disminución en la temperatura de la hoja. Sin embargo, cuando hay condiciones de estrés hídrico, las plantas isohídricas cierran los estomas, la transpiración se detiene y la temperatura de las hojas aumenta (Diago 2022).

Un aspecto importante a tener en cuenta la hora de utilizar esta tecnología son las variaciones ambientales como la nubosidad, la humedad o el viento que pueden afectar a la temperatura de las hojas. Para resolver este problema, se han desarrollado dos índices termográficos:

- Índice de Estrés Hídrico de Cultivos (CWSI) (Idso et al., 1981)

$$\text{CWSI} = \frac{T_{leaf} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}$$

- Índice de Conductancia Estomática (I_g) (Jones et al., 2002)

$$I_g = \frac{T_{dry} - T_{leaf}}{T_{leaf} - T_{wet}}$$

Donde:

T_{dry} Temperatura más alta posible de la hoja cuando no hay transpiración

T_{leaf} Temperatura de la hoja o canopy

T_{wet} Temperatura máxima de evapotranspiración

La T_{wet} , puede simularse humedeciendo una hoja con agua para imitar su hidratación máxima; y la T_{dry} puede simularse aplicando vaselina alrededor de la hoja (Jones & Grant 2015; Diago 2022).

Como resumen, se puede decir que la termografía ha supuesto un gran avance respecto a las técnicas tradicionales de evaluación del estado del viñedo, aportando una gran cantidad de medidas en muy poco tiempo, de una manera no invasiva, automatizada y con la posibilidad de utilizarla en grandes superficies de viñedo al poder ir colocada en diferentes plataformas móviles terrestres (Gutiérrez et al., 2018; Sepúlveda et al., 2016) o aéreas (Rodríguez-Fernández et al., 2020; Santesteban et al., 2017).



Figura 14. Termografía: (A) Cámara termográfica ULIRVISION modelo T5/T6. (B) Cámara termográfica ULIRVISION T100. Fuente: <https://www.ulirvisiotech.com/>.

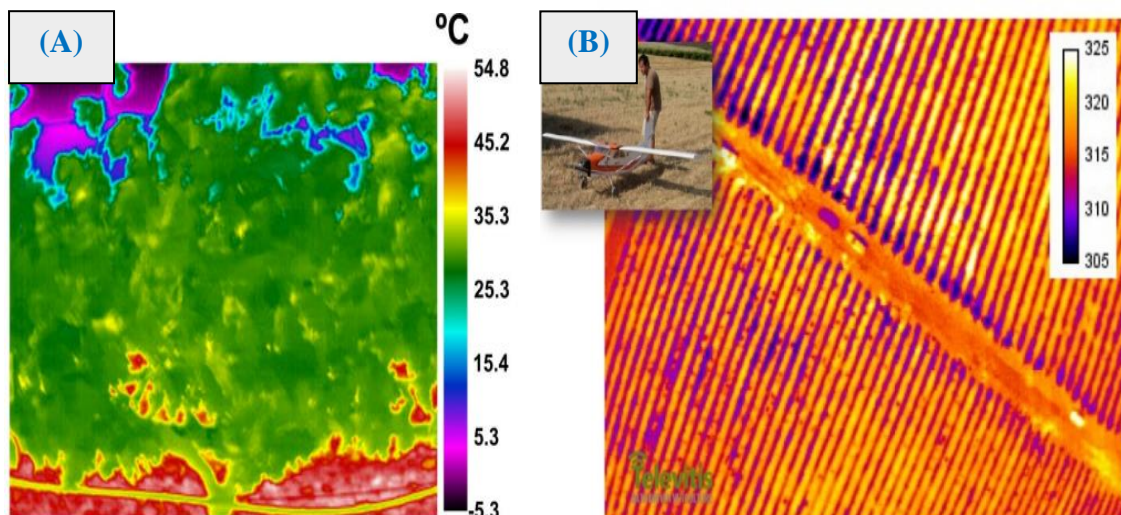


Figura 15. Termografía: (A) Imagen térmica perpendicular de la canopy de un viñedo adquirida mediante un vehículo terrestre en movimiento con una cámara termográfica. (B) Imagen térmica aérea de un viñedo obtenida mediante una cámara termográfica colocada en un dron. Fuente: (A y B) Javier Tardáguila Laso. (2021). Introducción a la viticultura de precisión. Universidad de La Rioja.

1.2.2.2. Espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS)

La espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) es un método analítico no invasivo, muy adecuado para varias aplicaciones agrícolas debido a su rápida adquisición de datos y a su capacidad de determinar más de un parámetro. Es fácil de usar y no requiere de gran preparación (Fernandez-Novales *et al.*, 2018).

La Tecnología NIRS es una técnica espectroscópica vibracional que se basa en la absorción de radiación NIRS con longitud de onda entre 770 – 2500 nm, a través de los enlaces moleculares del tipo X-H donde X corresponde a los átomos de carbono, nitrógeno y oxígeno. La interacción de la radiación en esa zona del espectro electromagnético con la muestra produce cambios a nivel molecular según la composición química y física de dicha muestra. La absorción de esta radiación NIRS es causada principalmente por las vibraciones y movimientos de plegado, alargamiento o deformación de los enlaces moleculares del tipo C-H, N-H, O-H y C-O. Una banda de absorción NIRS tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación NIRS coincide con la frecuencia de dichos enlaces (Williams 2001). La mayoría de las bandas principales de los grupos funcionales presentes en las moléculas de las muestras están localizadas en la región del infrarrojo medio, MIR. Un espectro o huella espectral NIRS está compuesto básicamente por sobretonos (bandas de menor intensidad que las bandas principales) y combinaciones de bandas de esos grupos funcionales que le confieren unas características únicas a dicha muestra (Shenk & Westerhaus 1995, Nicolai *et al.*, 2007; Fernandez-Novales *et al.*, 2018).

En productos agroalimentarios, la asignación de bandas de absorción es muy compleja, pero todo lo contrario ocurre cuando queremos determinar el contenido de agua, ya que es el componente mayoritario en las hojas y solo presenta enlaces del tipo O-H. Por lo tanto, si realizamos una medición espectral NIR en la superficie de las hojas, nos daría una absorción parcial o total de la radiación en los sobretonos (1.º: 760, 2.º: 970 y 3.º: 1450 nm) y en la banda de combinación (1940 nm) del grupo O-H. Estas zonas del espectro con longitudes de onda separadas entre si nos aportan una información muy útil del estado hídrico del viñedo, permitiendo estimar la concentración de agua que tiene cada muestra (Diago *et al.*, 2018).

La espectroscopía NIR está generalmente destinada a construir modelos de calibración y predicción de atributos o parámetros específicos, utilizando un método de referencia fiable (Diago *et al.*, 2017).

Se han realizado algunos estudios para demostrar el potencial de la espectroscopía NIR a la hora de evaluar el estado hídrico del viñedo. Diago *et al.*, (2018) y Fernández-Novales *et al.*, (2018) realizaron dos estudios basados en la adquisición de espectros NIR “on-the-go” (en movimiento) empleando un vehículo móvil terrestre. Ambos estudios comparaban los espectros NIR obtenidos con valores de Ψ y g_s obtenidos con un método de referencia. Los resultados obtenidos al correlacionar los valores de Ψ y g_s recogidos con los métodos de referencia frente a los adquiridos con la espectroscopía NIR en continuo, mostraron el enorme potencial de esta tecnología no destructiva para evaluar el estado hídrico del viñedo.

La extracción de la información más relevante de los espectros NIRS implica la utilización de herramientas de quimiometría basadas en modelos de regresión multivariante que exigen personal técnico cualificado. Estos algoritmos matemáticos nos permiten manejar una gran cantidad de variables espectrales, evitando la información redundante y buscando las mejores correlaciones de cara a una mejor cuantificación del parámetro de estudio. Por lo tanto, cada vez se hace más evidente la necesidad de desarrollar sensores más simples, que no utilicen el espectro NIR completo, más asequibles económicamente y que cuenten con un menor tiempo de procesamiento de los datos (Diago et al., 2018).

A continuación, en la Figura 16, se presentan dos equipos de espectroscopía del infrarrojo cercano (NIR):



Figura 16. Espectroscopía del infrarrojo cercano (NIR): (A) Equipo de espectroscopía portátil de contacto microPHAZIR RXAnalyzer (1600-2400 nm). (B) Equipo de espectroscopía a distancia Polytec NIR PSS para mediciones en continuo. **Fuente:** (A) www.thermofisher.com/. (B) www.redsilverttech.com/.

1.2.2.3. Cámaras multispectrales

La mayoría de los dispositivos espectrales adquieren un espectro completo con cientos de bandas espectrales de una región reducida o punto medido en la muestra. Sin embargo, existen cámaras multispectrales cuyo funcionamiento es totalmente contrario al de esos dispositivos espectrales. Las cámaras multispectrales (Figura 17) adquieren datos de áreas más amplias de una imagen, pero con un número reducido de bandas espectrales (normalmente de 3 a 10) mediante la proyección de imágenes multispectrales. Un ejemplo claro de esta tecnología son las cámaras estándar o RGB que utilizamos en nuestro día a día (ej. Réflex, cámaras incorporadas en smartphone), capaces de captar la luz en las longitudes de onda del color rojo (650 nm), verde (530 nm) y azul (460 nm) (Rodríguez-Pérez et al., 2007).

Las cámaras multispectrales se emplean para obtener información espectral simplificada a partir de índices espectrales que son independientes de las condiciones de iluminación (ej. Relación, normalización). Sin embargo, los índices espectrales calculados mediante

imágenes multiespectrales se relacionan habitualmente con el vigor de la planta y la biomasa fotosintéticamente activa (ej. NDVI, PCD). No obstante, existen varios índices que se han correlacionado bien con indicadores del estado hídrico de las plantas (ej. PRI), utilizándose como un indicador del estrés hídrico (Diago 2022).

La principal ventaja que presenta esta tecnología es que, al medir un número de bandas reducido o limitado, el desarrollo de modelos para la estimación de un determinado parámetro es más simple y sencilla que cuando se trabaja con el espectro completo.



Figura 17. Cámaras multiespectrales: **(A)** Cámara multiespectral RedEdge-P de cinco bandas espectrales. **(B)** Cámara multiespectral colocada en un dron. **Fuente:** (A) <https://grupoacre.es/>. (B) Javier Tardáguila Laso. (2021). *Tecnologías, Sensores y Plataformas*. Universidad de La Rioja.

2. OBJETIVOS:

El objetivo principal de este trabajo es la evaluación de un sensor de espectrofotometría NIRS como método no destructivo, rápido y de bajo coste para la monitorización del estado hídrico del viñedo.

Objetivos más específicos:

- Desarrollo y evaluación de modelos de regresión multivariante para la predicción del estado hídrico en el viñedo.
- Seguimiento del estado hídrico de un viñedo comercial mediante la generación de mapas de variabilidad espacio-temporal del potencial hídrico.

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto Nacional SpectralWater (PID-2019-108330RA-I00), que trata de desarrollar una herramienta multiespectral innovadora y no destructiva, que pueda utilizarse de forma próxima en campo y en tiempo real para una gestión más eficiente y sostenible del riego ante el cambio climático.

3. MATERIALES Y MÉTODOS:

3.1. Diseño experimental

La parte experimental y de adquisición de datos en campo se realizó en dos viñedos experimentales ubicados en Tudelilla, La Rioja, España (Lat. 42° 18' 18.26", Long. -2° 7' 14.15", Alt. 515 m); durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre de 2021. Esta zona es muy adecuada para llevar a cabo el experimento ya que presenta un clima mediterráneo semiárido, con veranos muy cálidos y escasas precipitaciones.

Para inducir una variabilidad notable del estado hídrico, en ambos viñedos se realizaron tres tratamientos de riego diferentes, en un diseño por bloques y de manera aleatoria. El riego se programó para aplicarse dos veces al día durante cinco días a la semana. Los tratamientos de riego fueron los siguientes:

- T0: Riego completo. Dos tuberías de agua paralelas que proporcionan un caudal de 6 L/h.
- T1: Riego moderado. Una sola tubería de agua que suministraba un caudal de 3 L/h (la mitad del caudal de T0).
- T2: Sin riego. Las plantas no fueron regadas durante todo el experimento.

En la Figura 18 presentada a continuación, se muestra el sistema de riego instalado para cada viñedo experimental.



Figura 18. Imágenes del sistema de riego utilizado en ambos viñedos: (A) Viñedo experimental (I). (B) Viñedo experimental (II).

3.1.1. Viñedo experimental (I)

Es un viñedo plantado en 2002 con vides de *Vitis vinifera* L. de la variedad Tempranillo (Clon 776), injertadas con el patrón R-110. Presenta un sistema de conducción en espaldera con un doble cordón Royat, con una orientación Norte-Sur y un marco de plantación de 2.60 x 1.20 metros. Las medidas en este viñedo se tomaron durante seis semanas distribuidas en los meses de julio, agosto y septiembre de 2021.

Para cada tratamiento de riego, se establecieron cuatro bloques, teniendo un total de 12 réplicas de tratamiento distribuidas de manera aleatoria en tres filas diferentes separadas entre ellas por la misma distancia (Figura 19). Cada réplica de tratamiento comprendía 25 plantas, distribuidas en cinco foros (entendiendo por foro al tramo de espaldera entre dos postes contiguos) y cada foro contenía cinco cepas. De los cinco foros, se descartaron el primero y último (considerados efecto borde), tomando medidas solo de los tres foros centrales. De cada uno de los tratamientos del estudio experimental solo se tuvo en cuenta la fila central para evitar el efecto borde.

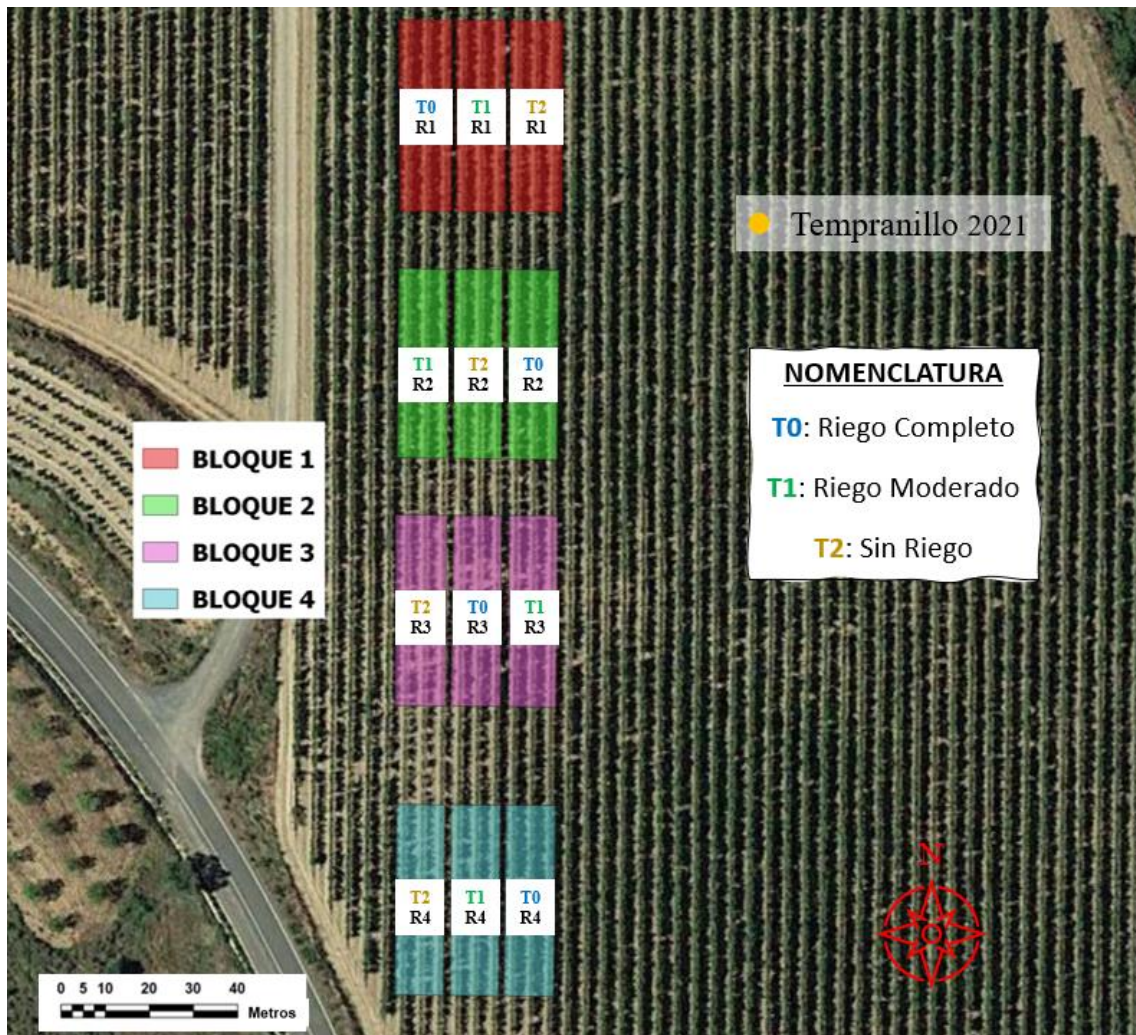


Figura 19. Diseño experimental del viñedo comercial de la variedad Tempranillo por bloques, distribuyendo los diferentes tratamientos de riego de forma aleatoria.

3.1.2. Viñedo experimental (II)

Es un viñedo plantado en 2016 con cepas de *Vitis vinifera* L. de la variedad Graciano injertadas con el patrón R-110. Presenta un sistema de conducción en espaldera con un doble cordón Royat, con una orientación Noroeste-Sureste y un marco de plantación de 2.60 x 1.20 metros. Las medidas en este viñedo se tomaron durante seis semanas distribuidas en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre de 2021.

Para cada tratamiento de riego, se establecieron tres bloques, teniendo un total de nueve réplicas de tratamiento distribuidas de manera aleatoria en tres filas diferentes separadas entre ellas por la misma distancia (Figura 20). Cada réplica de tratamiento comprendía 15 plantas, distribuidas en tres foros. De los tres foros, se tomaron medidas solo de la fila central.

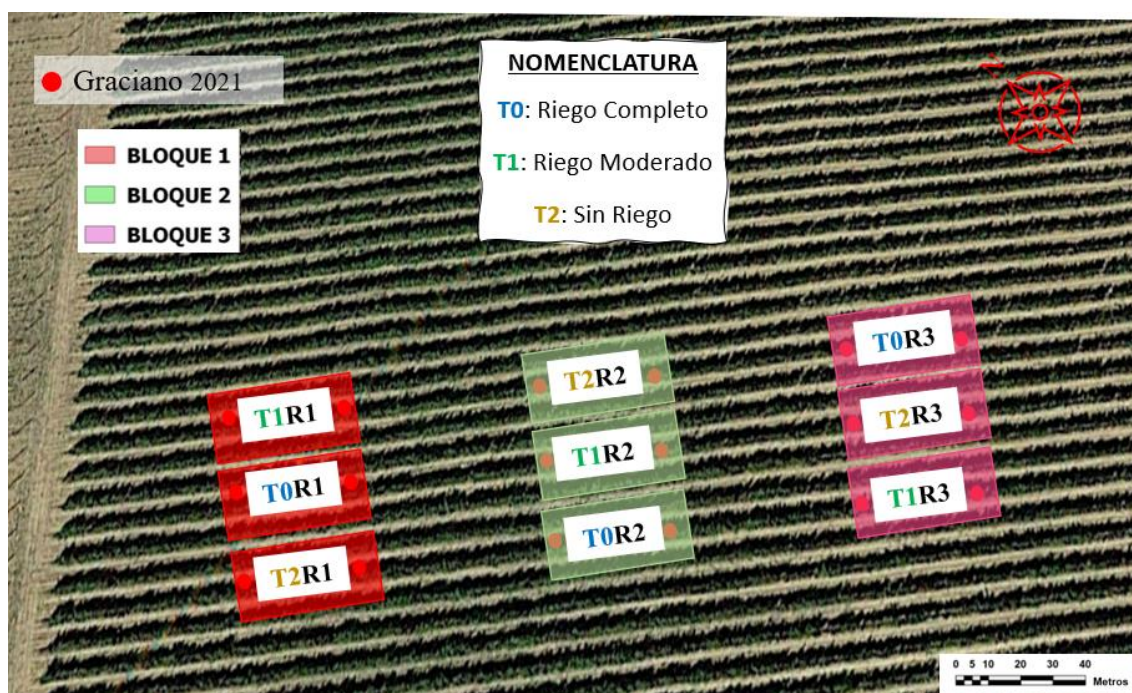


Figura 20. Diseño experimental del viñedo comercial de la variedad Graciano por bloques con los diferentes tratamientos de riego distribuidos de forma aleatoria.

3.2. Adquisición de las medidas espectrales

Las mediciones espectrales en ambos viñedos se realizaron en movimiento (“on the go”) y en condiciones de campo utilizando el sensor Insion 1.7 NT/H (Insion GmbH, Obersulm, Alemania), un microespectrómetro NIR; montado en una plataforma móvil terrestre. El Insion 1.7 NT/H es un sensor pasivo que detecta la radiación reflejada de las hojas, aunque también puede ser reconvertido a un sensor activo utilizando una fuente de luz externa. Este sensor trabaja en el rango espectral de 900-1900 nm, con una resolución de 8.2 nm, adquiriendo 118 puntos de datos por espectro a una frecuencia de 2.5Hz. El Insion 1.7 NT/H (dimensiones 6,9 x 3,9 x 1,3 cm) cuenta con un colimador para homogeneizar las trayectorias de la radiación percibida, un cable de fibra óptica que conecta el microespectrómetro con el colimador y un cable de alimentación conectado desde el microespectrómetro a un ordenador industrial (Figura 21).

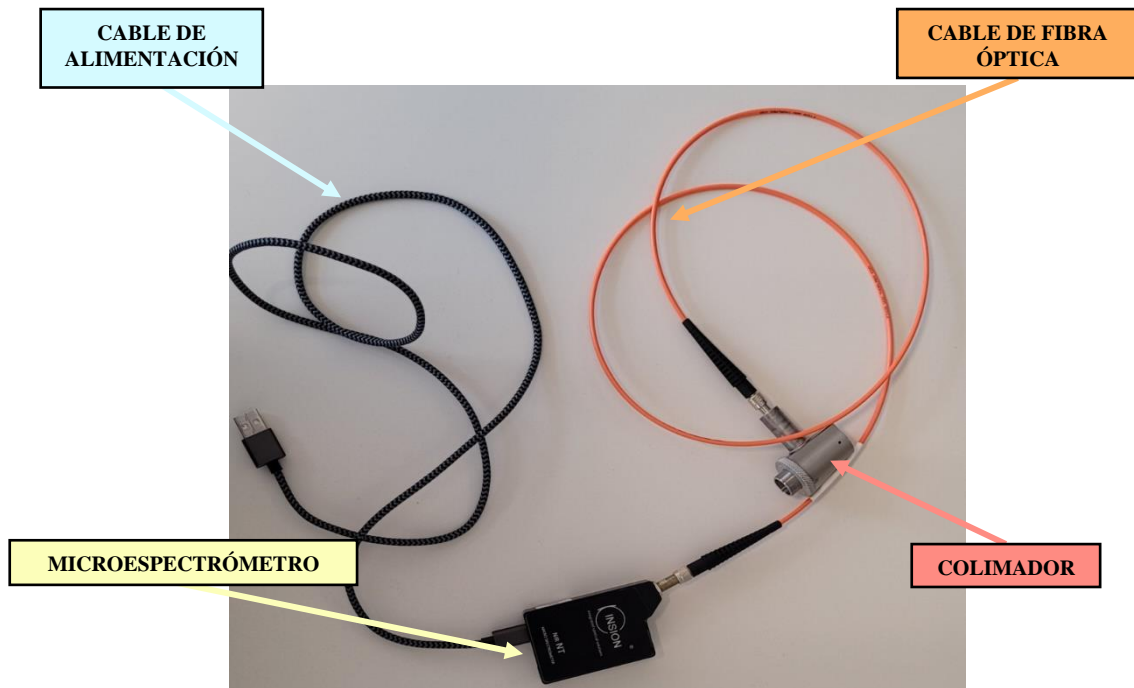


Figura 21. Diferentes partes del sensor InSION 1.7 NT/H (InSION GmbH, Obersulm, Alemania).

Este sistema fue montado en la parte delantera de una desbrozadora (940 Sherpa 4WD XL, AS-motor, Bühlertann, Germany) modificada, apuntando a la cara este de la espaldera, adquiriendo las medidas espectrales en continuo y de forma controlada por medio de un gatillo físico mientras la desbrozadora estaba en movimiento. Todas las plantas de las réplicas de tratamiento se midieron a una velocidad media de 3 km/h (Figura 22). En el viñedo experimental (I) las mediciones se realizaron por el lado este de la canopy y para el viñedo experimental (II) por el lado noreste.

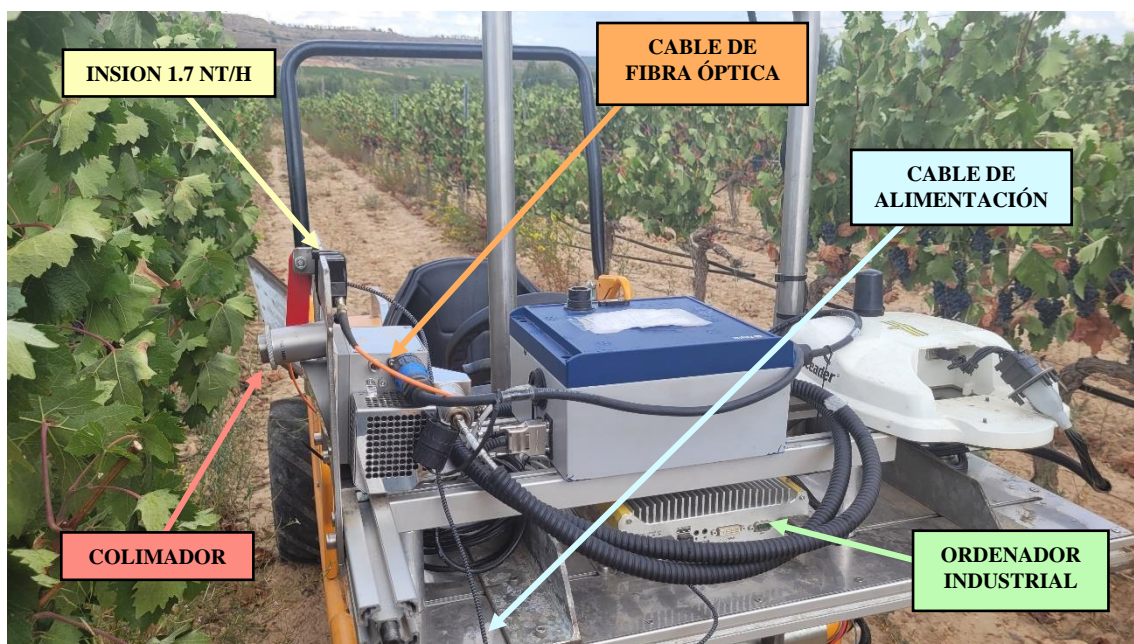


Figura 22. Equipos empleados para las mediciones espectrales en continuo con sus diferentes partes montado en la plataforma móvil terrestre.

Los espectros se adquirieron alrededor del mediodía solar, entre las 14:00-15:00 hora local en seis fechas diferentes para ambos viñedos experimentales comprendidas entre los meses de julio, agosto, septiembre y octubre de 2021 (Tabla 5).

El cabezal del sensor se encontraba a una altura de 0,95 metros del suelo, por encima de la zona de fructificación, para cubrir la parte más densa de la pared vegetativa. La distancia del sensor a la vegetación se mantuvo de forma constante entre 0.25 y 0.35 metros aproximadamente (Figura 23).

Tabla 5: Distribución de las seis fechas en las que se realizaron las medidas espectrales en ambos viñedos experimentales.

Nº de Fechas	Viñedo experimental (I) [Tempranillo]	Viñedo Experimental (II) [Graciano]
Fecha 1	7 de julio	14 de julio
Fecha 2	20 de julio	21 de julio
Fecha 3	27 de julio	12 de agosto
Fecha 4	11 de agosto	26 de agosto
Fecha 5	25 de agosto	8 de septiembre
Fecha 6	15 de septiembre	7 de octubre

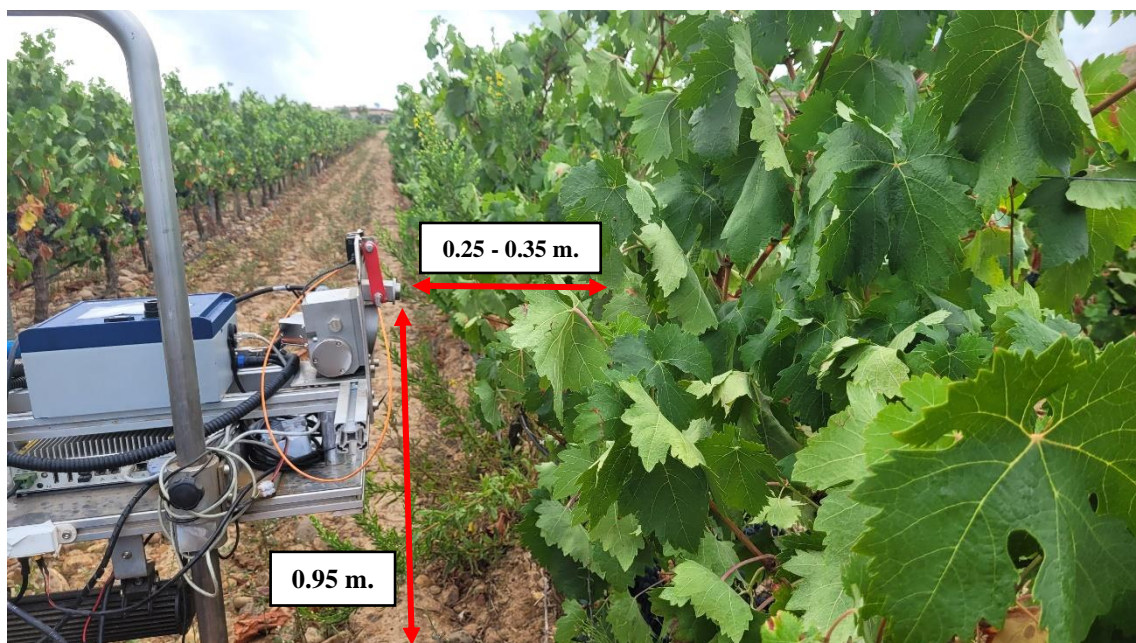


Figura 23. Vista lateral de la plataforma móvil terrestre en la que se detalla la altura y distancia a la vegetación del cabezal del sensor.

Antes de realizar las mediciones espectrales, se tomaron los valores de referencia (blanco y negro) en parado y de forma manual. El blanco se obtuvo utilizando un Spectralon (material con un 99% de reflectancia) y el negro tapando la entrada de luz del sensor. Estas medidas de referencia normalizan las medidas espectrales realizadas en movimiento mediante la activación de un software que posee el sensor (Insion 1.7 NT/H) según la siguiente ecuación:

$$R(\lambda) = \frac{G(\lambda) - D(\lambda)}{W(\lambda) - D(\lambda)}$$

Donde:

R (λ)	Reflectancia
G (λ)	Intensidad de la luz reflejada por la hoja
W (λ)	Intensidad de luz
D (λ)	Referencia de negro

La reflectancia obtenida de las medidas espectrales tomadas en parado y en movimiento se transformó a absorbancia por medio también del software del sensor aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Abs} = \log(1/R(\lambda))$$

Donde:

Abs	Absorbancia
R (λ)	Reflectancia

Cuando se realizan mediciones espectrales en movimiento, también se adquieren espectros e información procedente de huecos, madera, metal, etc. Por ello, se realizó una medida espectral de una hoja tomada en estático antes de cada medición en continuo. Esta medida se denomina firma espectral (Figura 24) y se empleó para realizar un proceso de filtrado de todas las mediciones en continuo, seleccionando los espectros que únicamente corresponden a la vegetación del viñedo.

Este proceso de filtrado se llevó a cabo con un código desarrollado por el grupo de investigación Televitis por medio de la plataforma de programación y cálculo numérico Matlab.

Firma espectral hoja de Tempranillo

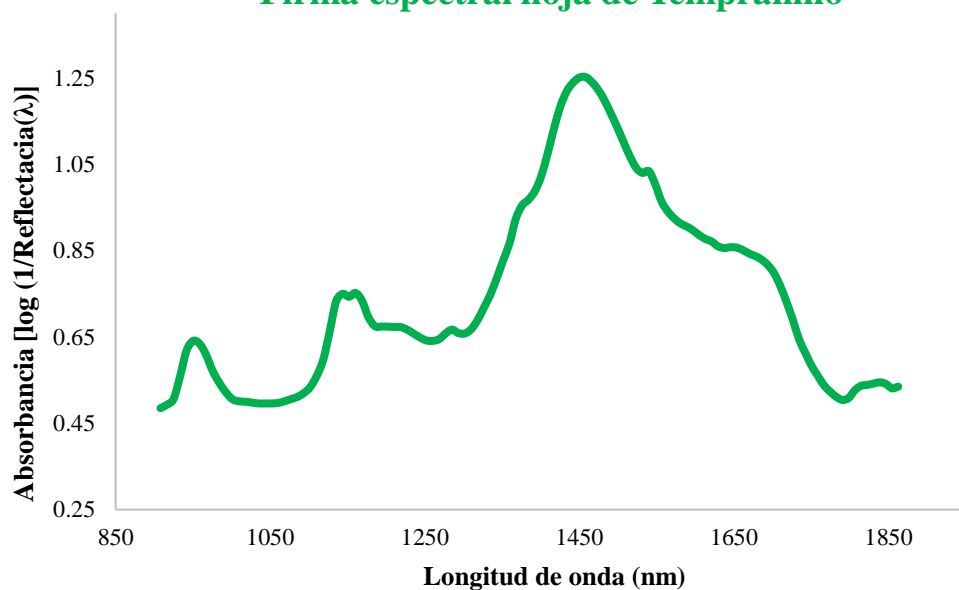


Figura 24. Firma espectral de una hoja de Tempranillo utilizada como filtro para la réplica de tratamiento T0 del bloque 1 ubicado en el viñedo experimental (I).

Las medidas espectrales en movimiento se realizaron en la fila intermedia de cada réplica de tratamiento, iniciándose la medida un metro antes del comienzo del bloque para adquirir los espectros a una velocidad constante y uniforme (Figura 25).



Figura 25. Medición en continuo realizada por un integrante del grupo Televitis de la fila intermedia correspondiente a la réplica de tratamiento T0 del bloque 1 situado en el viñedo experimental (I).

3.3. Medición del potencial hídrico de tallo como método de referencia

Se utilizó una cámara de presión de Schölander portátil (Modelo 600, PMS Instruments Co., Albany, EE.UU.) para medir como indicador de referencia del estado hídrico de la planta el Ψ_{stem} . La medición del Ψ_{stem} se realizó para cada réplica de tratamiento y al mismo tiempo que se adquirían las medidas espectrales (entre las 14:00-15:00 hora local).

Las plantas estudiadas en los viñedos experimentales (I) y (II) por el método de referencia fueron las situadas en los foros centrales de cada bloque (mismas cepas de las que se adquirieron las medidas espectrales). Simultáneamente a las medidas espectrales adquiridas en movimiento, se midió el Ψ_{stem} . De cada tratamiento constituido por tres foros, se seleccionaron tres cepas al azar perteneciente una a cada foro. Solo se cogió una hoja de cada cepa de la parte media-superior. Todas las hojas, antes de medir el Ψ_{stem} , se recubrieron con papel de aluminio durante una hora (adaptación oscura). De esta forma, tanto del viñedo experimental (I) como del viñedo experimental (II) se obtuvieron un total de 36 y 27 muestras respectivamente por día (3 cepas x 12 réplicas de tratamiento en (I) y 3 cepas x 9 réplicas de tratamiento en (II)), haciendo un total de 216 y 162 datos durante todo el experimento.

Las diferencias en el estado hídrico del viñedo se identificaron como alto, medio o bajo estrés hídrico utilizando los umbrales adaptados para el Ψ_{stem} definidos por Medrano et al; 2002 y se definen de la siguiente manera:

- Estrés hídrico alto (H): $\Psi_{\text{stem}} < -1.4$ MPa.
- Estrés hídrico medio (M): $-1,4 \leq \Psi_{\text{stem}} \leq -0,8$ MPa.
- Estrés hídrico bajo (L): $\Psi_{\text{stem}} \geq -0,8$ MPa.

3.4. Procesado de las medidas espectrales

Para la manipulación y procesado de los datos espectrales, así como el desarrollo de los modelos de calibración y predicción se utilizaron algoritmos programados por el grupo Televitis y la herramienta integral Unscrambler v.9.1 (CAMO ASA, Noruega).

Con la utilización de esta herramienta se obtuvo la relación matemática (modelo) óptima existente entre los datos proporcionados por el método de referencia y los datos espectrales. Los pasos realizados para el procesado de las medidas espectrales se detallan en los apartados siguientes.

3.4.1. Pretratamiento de los espectros

En primer lugar, las medidas espectrales en bruto correspondientes a las 15 cepas de cada réplica de tratamiento se dividieron en tres grupos, realizando el proceso de filtrado (firma espectral) para cada uno de ellos con el fin de seleccionar solo los espectros correspondientes a la vegetación del viñedo.

Para este proceso se desarrolló un código en MATLAB ad hoc por los miembros del grupo de investigación Televitis. Después de este filtrado, para cada uno de los foros (unidad de medida de este trabajo) se calculó el espectro promedio quedándonos solo con tres espectros de hoja por cada réplica de tratamiento. Se realizó a nivel de foro, ya que el tiempo de trabajo de recogida de muestras por el método de referencia en el momento del día en el que se realiza (14:00-15:00) es muy limitado. Por último, a los espectros promedio se le adjuntaron las medidas de Ψ_{stem} , repitiendo todo este proceso para la medición en continuo de cada una de las réplicas de tratamiento en ambos viñedos. De esta forma, se establecieron un conjunto de muestras total de 216 para el viñedo experimental (I) y 162 para el viñedo experimental (II). Este proceso previo se realizó antes de cualquier pretratamiento espectral con la herramienta Unscrambler v9.1.

3.4.2. Tratamiento espectral

Las medidas espectrales tomadas en campo presentan componentes o efectos no deseados denominados comúnmente como ruidos que provocan variaciones en la señal percibida. Los ruidos pueden estar originados por diferentes causas como: variaciones de temperatura y humedad, componentes de la instrumentación o por la propia naturaleza de la muestra.

Con el fin de corregir o minimizar ese ruido, se utilizaron dos de los principales pretratamientos de la señal espectral: derivación y corrección del efecto multiplicativo (Fernández-Navales 2009).

- Derivación: utilizada para la discriminación espectral (acentuando pequeñas diferencias entre espectros similares), el aumento de la resolución espacial (incrementando la resolución de bandas espectrales muy solapadas) y el análisis cuantitativo (corrección de absorciones irrelevantes relacionadas con el ruido) (Fernández-Navales 2009).

Para este pretratamiento se emplean 2 derivadas:

- 1ª derivada de Savitzky–Golay
 - 2ª derivada de Savitzky-Golay
- Corrección del efecto multiplicativo de la dispersión (MSC): corrige los desplazamientos espectrales producidos por el diferente tamaño de partículas de las muestras. Este pretratamiento reduce los efectos de la radiación dispersa y aumenta la relación entre la señal espectral y el parámetro de interés, eliminando información irrelevante y distribuyendo las muestras de manera más regular (Fernández-Navales 2009).

Se probaron 4 combinaciones diferentes de estos pretratamientos espectrales con el fin de obtener una amplia variedad de modelos de predicción para el total de medidas espectrales tomadas en ambos viñedos experimentales. Las combinaciones fueron las siguientes:

- 1ª derivada de Savitzky-Golay
- 2ª derivada de Savitzky-Golay
- MSC + 1ª derivada de Savitzky-Golay
- MSC + 2ª derivada de Savitzky-Golay

El **segundo paso** consistió en realizar una reducción de variables con la herramienta PCA (Principal Component Analysis) para cada pretratamiento espectral. El PCA nos permite reducir grandes volúmenes de datos en un número simplificado de variables sin perder información relevante, hallando la máxima variabilidad y anomalías de las muestras.

El **tercer paso** consistió en la construcción y desarrollo de modelos de predicción. Para ello, se utilizó una técnica quimiométrica de análisis cuantitativo como estrategia de calibración. Con esta calibración, se relacionó la información espectral con la información del parámetro de referencia, definiendo el tratamiento matemático de los datos, el segmento del espectro y el número de grupos de validación cruzada utilizado. Se seleccionó la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) para la predicción del Ψ_{stem} utilizando los espectros obtenidos de ambos viñedos experimentales por separado en el rango de 900-1900 nm. Se escogió el algoritmo PLS por ser el método más utilizado para el análisis de datos espectrales debido a su fiabilidad y precisión (Shenk & Westerhaus 1995).

Para evitar el sobreajuste y obtener una mayor robustez en los modelos se realizó una validación cruzada de 10 grupos. De esta forma, el conjunto de muestras de calibración se dividió en 10 grupos, utilizando uno de ellos para verificar los resultados (predicción) y el resto para construir el modelo de calibración de forma iterativa.

Los descriptores estadísticos utilizados para la evaluación y selección de los modelos de predicción más adecuados fueron:

- **R²**: coeficiente de determinación de la regresión o porcentaje de la variación existente en el grupo de calibración que puede ser explicado por la regresión. Se persigue un valor cercano a la unidad. Según indican Shenk & Westerhaus (1995), un valor de R² superior a 0,90 indica que la calibración es excelente; si su valor se encuentra entre 0,89-0,70 la calibración se considera buena; si dicho coeficiente está comprendido entre 0,69-0,50 indica una buena separación entre muestras de alto, medio y bajo contenido en el parámetro testado; si el valor del R² oscila entre 0,49-0,30 indica una buena discriminación entre muestras de alto y bajo contenido en el parámetro testado; y por último, para coeficientes de determinación menores de 0,29 la calibración resultante es poco significativa. Se pueden diferenciar un coeficiente de determinación de calibración (R²_c) y de validación cruzada (R²_{cv}).
- **RMSEC**: error cuadrático medio de calibración
- **RMSECV**: error cuadrático medio de validación cruzada
- El número de variables latentes (**LV**) utilizado en el modelo de regresión multivariante.

3.5. Generación de mapas

Se utilizó QGIS v.3.16, (Hannover), un sistema de información geográfica de software libre que permite por medio de la herramienta “Multilevel-b-spline interpolation” sin refinamiento, el desarrollo de mapas de interpolación. Gracias a los mapas de interpolación generados por esta herramienta de georreferenciación desarrollada por la fundación OSGeo, se puede visualizar la variabilidad espacial y temporal de ambos viñedos experimentales en las diferentes fechas estudiadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Valores de referencia del estado hídrico del viñedo (Ψ_{stem})

A continuación, se muestran el rango de valores y estadísticas descriptivas (Tablas 6-8) del estado hídrico de ambos viñedos experimentales en términos de Ψ_{stem} obtenidos por el método referencia. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) mediante el software de análisis estadístico InfoStat para estudiar si existían diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de riego (Tabla 6) y en las distintas fechas de medición para cada viñedo experimental (Tablas 7 y 8). Sin embargo, es importante reseñar que este no era el objetivo principal del trabajo, sino el desarrollo de los modelos de estimación del estado hídrico del viñedo a partir de la información espectral obtenida con el sensor espectral de bajo coste en continuo, de forma próxima.

Los resultados y estadísticas descriptivas por tratamiento de riego para cada viñedo se muestran en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6: Estadísticas descriptivas del Ψ_{stem} de mediodía de ambos viñedos experimentales mostrando las diferencias significativas entre las medias para cada tratamiento.

TTO. de riego	Ψ_{stem} (MPa)							
	Viñedo experimental (I)				Viñedo experimental (II)			
	Min.	Max.	Media	SD	Min.	Max.	Media	SD
	N = 216				N = 162			
T0	-1.95	-0.9	-1.37 <i>b</i>	0.251	-1.30	-0.05	-0.63 <i>b</i>	0.262
T1	-2.1	-0.85	-1.45 <i>ab</i>	0.283	-1.35	-0.30	-0.78 <i>a</i>	0.284
T2	-2.15	-0.95	-1.49 <i>a</i>	0.328	-1.30	-0.10	-0.76 <i>a</i>	0.276

T0: riego completo. T1: riego moderado. T2: sin riego. N: número de muestras; Min: mínimo; Max: máximo; SD: desviación estándar. Las diferentes letras (en cursiva) dentro de la columna media para cada viñedo experimental, se refieren a valores significativamente diferentes de Ψ_{stem} en $p < 0.05$.

Como se muestra en la Tabla 6, existe una clara separación entre tratamientos durante el período de estudio, observándose diferencias significativas entre las medias de Ψ_{stem} para los tratamientos T0 y T2 en ambos viñedos. Esto nos indica que los diferentes tratamientos de riego establecidos generaron con éxito una amplia variabilidad en el estado hídrico de los viñedos experimentales.

Los valores de Ψ_{stem} variaron entre -0.85 a -2.15 MPa para el viñedo experimental (I) y entre -0.10 a -1.35 MPa para el viñedo experimental (II). En el viñedo experimental (I), el tratamiento sin riego (T2) mostró los valores de Ψ_{stem} más negativos, mientras que en el viñedo experimental (II) los valores más negativos se observaron para el tratamiento de riego moderado.

Las Tablas 7 y 8, muestran la evolución de la media y la desviación estándar de Ψ_{stem} en cada viñedo experimental, bajo los tres diferentes tratamientos de riego impuestos a lo largo de seis fechas en las que se tomaron las mediciones.

Tabla 7: Resumen de la media y desviación típica del Ψ_{stem} en vides del viñedo experimental (I) sometidas a distintos tratamientos de riego durante seis fechas diferentes (N° de muestras:216).

		Ψ_{stem} (MPa)					
		Viñedo experimental (I) [Tempranillo]					
Tratamiento de riego		07-jul	20-jul	27-jul	11-ago	25-ago	15-sep
T0		-1.14 ± 0.123 <i>a</i>	-1.19 ± 0.079 <i>a</i>	-1.16 ± 0.096 <i>b</i>	-1.46 ± 0.063 <i>a</i>	-1.61 ± 0.141 <i>b</i>	-1.65 ± 0.202 <i>b</i>
T1		-1.18 ± 0.196 <i>a</i>	-1.22 ± 0.066 <i>a</i>	-1.26 ± 0.109 <i>ab</i>	-1.51 ± 0.091 <i>a</i>	-1.68 ± 0.144 <i>ab</i>	-1.85 ± 0.159 <i>a</i>
T2		-1.09 ± 0.080 <i>a</i>	-1.27 ± 0.140 <i>a</i>	-1.35 ± 0.164 <i>a</i>	-1.56 ± 0.146 <i>a</i>	-1.76 ± 0.130 <i>a</i>	-1.95 ± 0.190 <i>a</i>
T0: riego completo. T1: riego moderado. T2: sin riego. Las diferentes letras (en cursiva) dentro de las columnas se refieren a valores significativamente diferentes de Ψ_{stem} en $p < 0.05$.							

Como se indica en la Tabla 7, se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las medias de tratamientos en tres de las seis fechas de medición. No se encontraron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos para las fechas del 7 y 20 de julio y del 11 de agosto. Esto puede deberse a que se produjeron precipitaciones (estación agroclimática en Ausejo del Gobierno de La Rioja) a finales de junio y mediados de julio (10,1 y 9,9 l/m²) y por un problema técnico de la bomba de riego previa al periodo de maduración, por lo que los distintos regímenes de riego fueron compensados y las posibles diferencias mitigadas.

Pese a esto, la evolución de las medias de Ψ_{stem} muestran una tendencia adecuada, ya que los valores más negativos suelen encontrarse en el tratamiento sin riego (T2) y los menos negativos en el tratamiento de riego completo (T0). En el caso de las vides sin riego (T2), su estado hídrico disminuyó de una forma constante e intensa (mayor negatividad de valores) hasta la última fecha, observándose una ligera tendencia decreciente también para el resto de los tratamientos, pero sin la misma severidad.

A continuación, en la Tabla 8, se expone la evolución de la media y la desviación estándar de Ψ_{stem} en el viñedo experimental (II) bajo los tres diferentes tratamientos de riego impuestos a lo largo de las seis fechas que difieren con las escogidas para el viñedo experimental (I).

Tabla 8: Resumen de la media y desviación típica del Ψ_{stem} en vides del viñedo experimental (II) sometidas a distintos tratamientos de riego durante seis fechas diferentes (N° de muestras:162).

		Ψ_{stem} (MPa)					
		Viñedo experimental (II) [Graciano]					
Tratamiento de riego		14-jul	21-jul	12-ago	26-ago	08-sep	07-oct
T0		-0.29 ± 0.191 <i>a</i>	-0.56 ± 0.058 <i>a</i>	-0.78 ± 0.100 <i>a</i>	-0.62 ± 0.180 <i>b</i>	-0.51 ± 0.119 <i>a</i>	-1.01 ± 0.151 <i>a</i>
T1		-0.42 ± 0.066 <i>a</i>	-0.62 ± 0.076 <i>a</i>	-0.89 ± 0.179 <i>a</i>	-0.92 ± 0.166 <i>a</i>	-0.68 ± 0.233 <i>a</i>	-1.14 ± 0.206 <i>a</i>
T2		-0.38 ± 0.185 <i>a</i>	-0.58 ± 0.075 <i>a</i>	-0.89 ± 0.121 <i>a</i>	-0.96 ± 0.114 <i>a</i>	-0.66 ± 0.153 <i>a</i>	-1.09 ± 0.110 <i>a</i>
T0: riego completo. T1: riego moderado. T2: sin riego. Las diferentes letras (en cursiva) dentro de las columnas se refieren a valores significativamente diferentes de Ψ_{stem} en $p < 0.05$.							

A pesar de que en la Tabla 8 solo se muestren diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) para una de las fechas de medición (26 de agosto); la evolución de las medias de Ψ_{stem} es coherente para cada tratamiento de riego, ya que los valores más negativos suelen encontrarse en el T2 y los valores menos negativos en el T0. Considerando las mediciones individuales de la vid de Ψ_{stem} , estas oscilaron entre -0.29 y -1.14 MPa a lo largo del periodo de estudio.

En la Tabla 8, también se puede observar que los valores de Ψ_{stem} aumentaron durante la fecha del 8 de septiembre, volviendo a caer en la última semana de medición. La recuperación de los valores de Ψ_{stem} de las plantas con un riego completo, moderado o sin riego en esta penúltima fecha se debe a las precipitaciones (estación agroclimática en Ausejo del Gobierno de La Rioja) acontecidas en la primera semana de septiembre (13,1 l/m²). Esto provocó una menor negatividad de Ψ_{stem} para los tres tratamientos para una posterior tendencia decreciente hasta el 7 de octubre.

En resumen, se puede decir que, aunque las diferencias entre los tratamientos T0 y T2 en las distintas fechas de medición fueron menos marcadas para el viñedo experimental (II) que para el viñedo experimental (I), sí que se observa una tendencia decreciente global entre las medias de cada tratamiento ya que los valores más negativos de Ψ_{stem} (salvo alguna excepción) se encuentran en el T2 y lo menos negativos en el T0 durante todo el periodo de estudio.

4.2. Modelos de regresión para la predicción del estado hídrico de los viñedos experimentales.

En la Tabla 9 se muestran los diferentes modelos de predicción elaborados con la herramienta PLS para cada una de las combinaciones de pretratamientos espectrales realizados con el total de medidas espectrales de ambos viñedos (N = 216 para el viñedo experimental (I) y N = 162 para el viñedo experimental (II)). Se obtuvo un amplio número de modelos después de realizar la validación cruzada, utilizando el mínimo número de variables latentes para evitar el sobreajuste de los modelos.

La elección del mejor modelo para cada viñedo experimental se realizó según el siguiente criterio: 1º Menor error del modelo (RMSECV), 2º Menor número de variables latentes (LV) y 3º Mayor coeficiente de determinación de validación cruzada (R^2_{cv}). Se escogió como principal criterio de selección el estadístico RMSECV a la hora de estimar el Ψ_{stem} a través de un modelo de regresión multivariante PLS. Los mejores modelos de predicción para cada pretratamiento espectral se marcaron por colores para ambos viñedos experimentales (Tabla 9), mientras que el mejor modelo de predicción fue remarcado en color azul en ambas variedades vitícolas.

Tabla 9: Resultados de los distintos modelos de predicción realizados para cada combinación de pretratamiento espectral con validación cruzada de ambos viñedos experimentales (Remarcado en azul el modelo elegido para cada viñedo experimental).

TRATAMIENTO ESPECTRAL	Viñedo experimental (I) [Tempranillo]				Viñedo experimental (II) [Graciano]			
	Validación cruzada				Validación cruzada			
	N	RMSECV	Nº Variables Latentes	R^2_{cv}	N	RMSECV	Nº Variables Latentes	R^2_{cv}
1ª Derivada de Savizky-Golay	216	0.145	14	0.787	162	0.158	9	0.686
	215	0.142	12	0.795	161	0.155	8	0.693
	214	0.121	12	0.825	160	0.138	11	0.757
	213	0.126	13	0.841	159	0.135	10	0.750
	212	0.126	11	0.813	158	0.154	9	0.697
MSC + 1ª Derivada de Savizky-Golay	216	0.135	11	0.786	162	0.153	15	0.703
	214	0.129	12	0.802	161	0.156	11	0.693
	213	0.124	13	0.82	160	0.151	11	0.713
	212	0.126	11	0.813	159	0.153	10	0.699
2ª Derivada de Savizky-Golay	216	0.164	14	0.741	162	0.173	8	0.621
	215	0.141	13	0.795	160	0.157	9	0.686
	214	0.129	10	0.826	159	0.159	8	0.678
	213	0.135	14	0.817	158	0.154	9	0.697
MSC + 2ª Derivada de Savizky-Golay	216	0.132	9	0.795	162	0.183	8	0.575
	215	0.128	9	0.807	160	0.170	9	0.635
	214	0.128	9	0.809	159	0.168	9	0.640
	213	0.125	9	0.814	158	0.168	9	0.640
	212	0.126	9	0.814	157	0.161	9	0.669

Para el viñedo experimental (I), todos los modelos obtuvieron unos coeficientes de determinación superiores a 0.70, por lo que presentaron un buen ajuste. Por otro lado, el error de los modelos (RMSECV) y el número de variables latentes fueron los valores que más oscilaron según la aplicación de los pretratamientos espectrales. Atendiendo al error de la validación cruzada, los modelos nunca superaron el valor de 0.170 MPa.

Por otra parte, los modelos de predicción construidos para el viñedo experimental (II) presentaron errores (RMSECV) superiores a los del viñedo experimental (I) y sus coeficientes de determinación, la mayoría fueron inferiores a 0.70. El número de variables latentes para cada modelo fue inferior a los recogidos en el viñedo experimental (I), sin embargo, el error y el coeficiente de determinación fueron los factores más selectivos a la hora de decidir el mejor modelo de predicción (Tabla 9).

4.2.1. Modelo de regresión seleccionado para la predicción del estado hídrico del viñedo experimental (I).

El tratamiento espectral más efectivo para el desarrollo del modelo de predicción de Ψ_{stem} del viñedo experimental (I) resultó ser la combinación MSC + 2ª derivada de Savitzky-Golay, ya que presentó un RMSEC de 0.125 MPa, un reducido número de variables latentes (LV = 9) y un buen coeficiente de determinación ($R^2_{\text{cv}} = 0.814$) (Tabla 9).

Los resultados del mejor modelo de predicción escogido para el viñedo experimental (I), relacionando los valores predichos y medidos de Ψ_{stem} se muestran en la Figura 26.

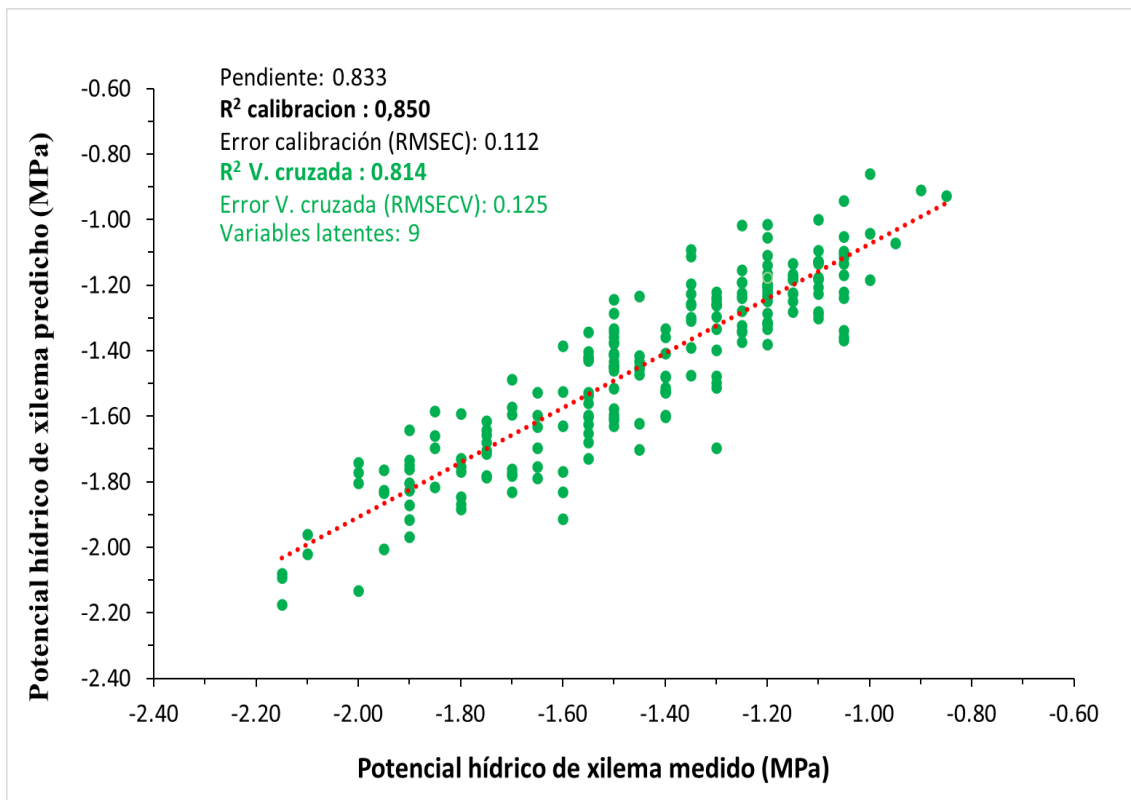


Figura 26. Gráfico de regresión para la estimación de Ψ_{stem} utilizando el mejor modelo de predicción PLS construido a partir de las mediciones espectrales adquiridas en el viñedo experimental (I).

El modelo de predicción PLS construido y seleccionado para el viñedo experimental (I) ofreció unos resultados más que satisfactorios en comparación con otras investigaciones (Fernández-Navales et al., 2018; Diago et al., 2018) realizadas en la misma parcela que emplearon la misma metodología (Espectroscopía NIR proximal adquirida mediante el método “on-the-go” en una plataforma móvil terrestre) para la monitorización del estado hídrico en viñedo.

Respecto a los estadísticos descriptivos, el modelo de predicción PLS escogido para la parcela de Tempranillo presentó un valor RMSECV (0.125 MPa) muy inferior al de otros trabajos como Fernández-Navales et al., (2018) o Diago et al., (2018) que obtuvieron unos valores de 0.157 MPa y 0.171 MPa respectivamente. Los trabajos comentados anteriormente, obtuvieron unos coeficientes de determinación ligeramente superiores ($R^2_{cv} = 0.89$ y $R^2_{cv} = 0.83$) al del modelo de predicción PLS seleccionado. No obstante, hay que destacar la diferencia entre los sensores utilizados, ya que tanto Fernández-Navales et al., (2018) como Diago et al., (2018), emplearon un espectrómetro de gran precisión y por lo tanto de un mayor coste de adquisición (Polytec PSS 2120) frente al sensor de bajo de coste manejado para este trabajo.

En comparación con otras tecnologías utilizadas en la actualidad para la monitorización del estado hídrico en plantas con una plataforma móvil terrestre, como la termografía, el modelo de predicción PLS escogido para la parcela Tempranillo mostró mejores estadísticos descriptivos respecto a los estudios de Gutiérrez et al., (2018) y Gutiérrez et al., (2021). Los trabajos de investigación de Gutiérrez et al., (2018, 2021) presentaron unos coeficientes de determinación inferiores ($R^2_{cv} = 0.59$, $R^2_{cv} = 0.71$) al modelo de predicción PLS seleccionado para el viñedo experimental (I) (Figura 26). La capacidad predictiva de los modelos generados en ambos trabajos de investigación (RMSECV = 0.195 MPa, RMSECV = 0.1509 MPa) también resultó ser inferior al modelo presentado en la parcela Tempranillo.

Otros estudios como Fernández-Navales et al., (2021), combinan el uso de cámaras termográficas, sensores ambientales e imagen multiespectral mediante el uso de un robot autónomo terrestre para la monitorización del estado hídrico del viñedo utilizando como parámetro de referencia el Ψ_1 . En comparación con dicha investigación, el modelo de predicción PLS escogido para el viñedo experimental (I) mostró un coeficiente de determinación muy superior al de los modelos desarrollados con esta combinación de sensores ($R^2_{cv} = 0.41$).

4.2.2. Modelo de regresión seleccionado para la predicción del estado hídrico del viñedo experimental (II).

En relación a los resultados obtenidos para el viñedo experimental (II), el mejor modelo de predicción resultó ser el pretratamiento espectral con 1ª derivada de Savitzky-Golay, ya que pese a tener un mayor número de variables latentes (LV = 11), fue el tratamiento

con el error más reducido ($RMSECV = 0.138$ MPa) y con un buen coeficiente de determinación ($R^2_{cv} = 0.757$) (Tabla 9).

Los resultados del mejor modelo de predicción escogido para el viñedo experimental (II), relacionando los valores predichos y medidos de Ψ_{stem} , se muestran en la Figura 27.

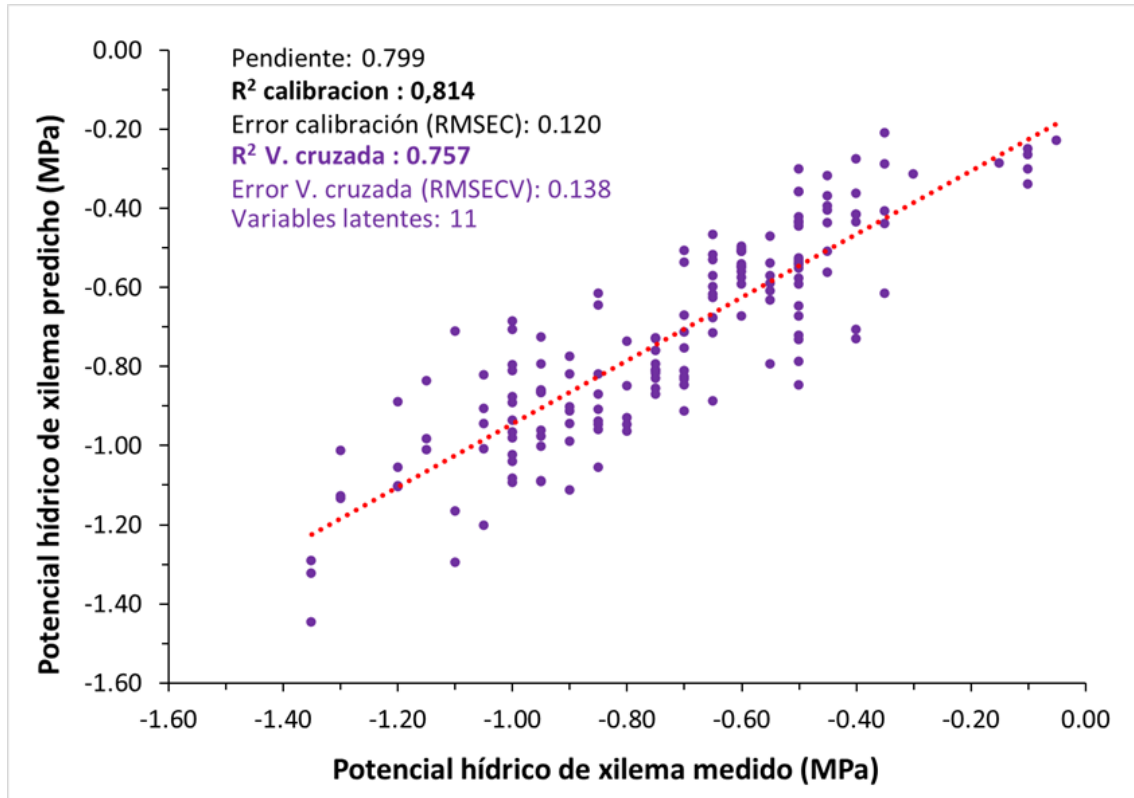


Figura 27. Gráfico de regresión para la estimación de Ψ_{stem} utilizando el mejor modelo de predicción PLS construido a partir de las mediciones espectrales adquiridas en el viñedo experimental (II).

Respecto a los estadísticos descriptivos, del modelo de predicción PLS escogido para la parcela de Graciano, estos fueron muy similares al de las investigaciones de Fernández-Novales et al., (2018) y Diago et al., (2018). La Figura 27 muestra unos valores de RMSECV inferiores al de ambos trabajos. En comparación con el valor del coeficiente de determinación, las investigaciones de Fernández-Novales et al., (2018) y Diago et al., (2018) obtuvieron un R^2_{cv} superiores al del modelo PLS escogido para el viñedo experimental (II). Sin embargo, el modelo de predicción PLS desarrollado con la utilización del sensor de bajo coste Inision 1.7 NT/H ofreció unos buenos resultados frente al sensor Polytec PSS 2120 utilizado en las anteriores investigaciones.

En el presente estudio experimental, donde los espectros NIR se adquirieron de forma proximal mediante el método “on-the-go” en un plataforma terrestre, los resultados obtenidos en el modelo de predicción PLS mostrado en la Figura 27, fueron superiores a los logrados mediante termografía para la monitorización del estado hídrico en viñedo.

Investigaciones como la de Gutiérrez et al., (2021) y Gutiérrez et al., (2018), obtuvieron un RMSECV superior y un coeficiente de determinación inferior al del modelo de predicción PLS escogido para la parcela de Graciano.

En comparación con otro estudio en el que emplearon otra metodología para evaluar el estado hídrico en viñedo de manera no destructiva, el modelo de predicción PLS escogido para el viñedo experimental (II) con un R^2_{cv} de 0.76 fue muy superior al de los modelos desarrollados con el robot autónomo terrestre en la investigación de Fernández-Navales et al., (2021).

Tras el análisis y comparación de los modelos de predicción PLS escogidos para ambos viñedos experimentales frente a otros trabajos que emplearon la misma metodología o tecnologías actuales para la monitorización del estado hídrico en plantas, se puede afirmar, que los resultados obtenidos en este estudio experimental fueron más que satisfactorios ya que fueron mejores o similares al de los estudios anteriormente nombrados, pero empleando un sensor miniaturizado, y de coste entre 5 y 10 veces inferior.

4.3. Monitorización del estado hídrico de los viñedos experimentales.

Para analizar la variabilidad espacial y temporal del estado hídrico de ambos viñedos experimentales, se realizaron mapas de interpolación de los valores de Ψ_{stem} , generando dos tipos de mapas:

- **Referencia:** mapas de interpolación con los valores de Ψ_{stem} obtenidos mediante el método de referencia (Cámara de presión de Schölander) de cada viñedo experimental.
- **Predicho:** mapas de interpolación con los valores de Ψ_{stem} estimados utilizando el mejor modelo de predicción PLS (Construido a partir de los datos recopilados por el sensor Inision 1.7 NT/H) para ambos viñedos experimentales.

Los resultados de la generación de mapas a través de la interpolación de los datos obtenidos nos permiten visualizar y conocer el estado hídrico de los viñedos en las diferentes fechas en las que se desarrolla el estudio experimental. Se realizó una clasificación en cinco intervalos de Ψ_{stem} en todos los mapas de interpolación.

A continuación, se expondrán los mapas de interpolación comparando los valores de Ψ_{stem} obtenidos por el método de referencia frente a los valores Ψ_{stem} predichos por el mejor modelo de regresión PLS para cada viñedo experimental (Tabla 9). La comparación de ambos mapas (Referencia vs. Predicho) se llevó a cabo para cada una de las fechas de medición del estudio experimental para comprobar la fiabilidad del modelo seleccionado. Al mismo tiempo, la monitorización del estado hídrico de cada una de las parcelas experimentales nos facilita un seguimiento de la evolución del Ψ_{stem} durante el proceso de maduración.

4.3.1. Viñedo experimental (I) [Tempranillo]

Los mapas de interpolación, referencia y predichos, para cada una de las fechas de medición correspondientes a la parcela de Tempranillo se muestran en las Figuras 28, 29 y 30.

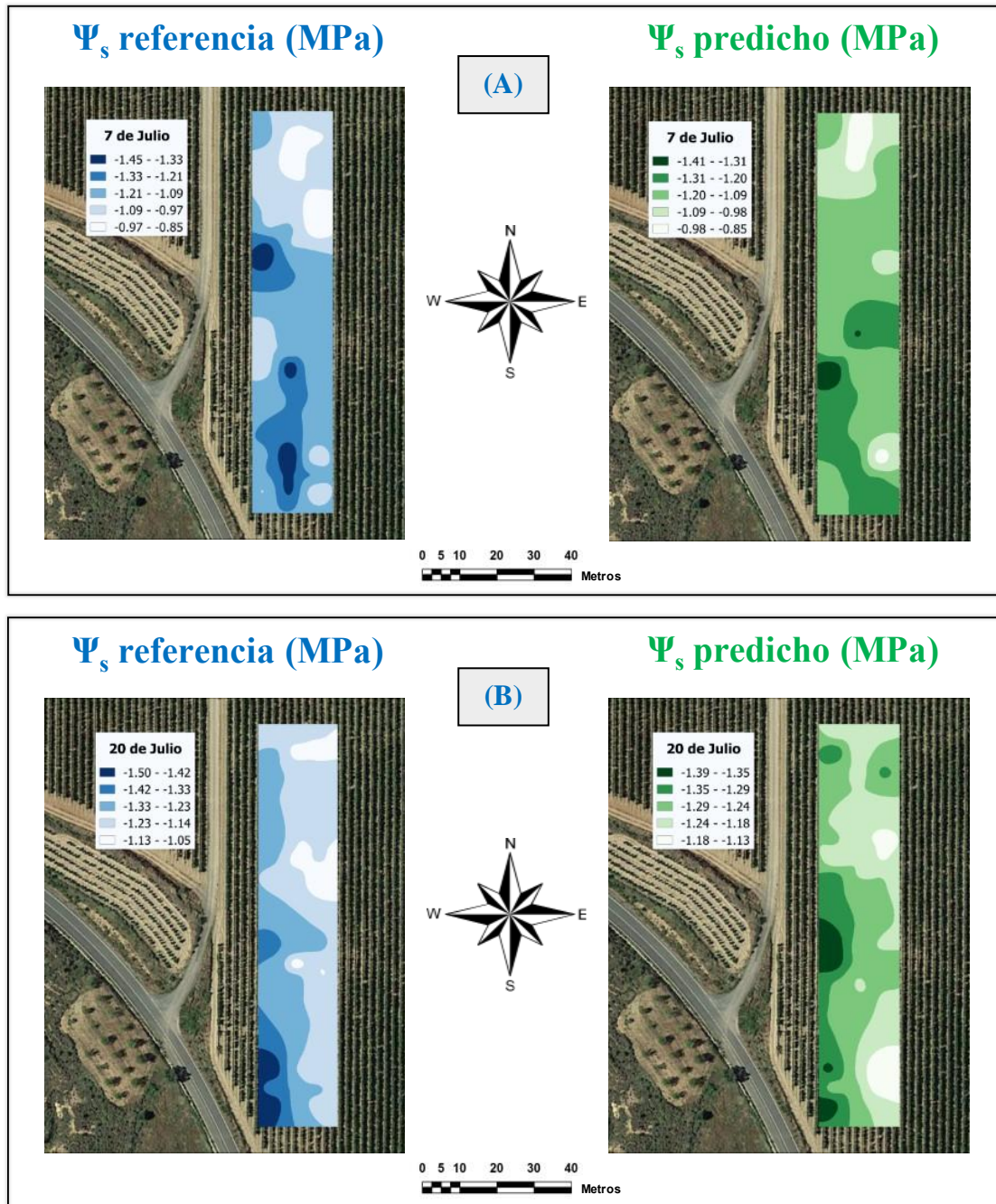


Figura 28. Mapas del estado hídrico del viñedo experimental (I) obtenidos con los valores del método de referencia y por el modelo de regresión PLS seleccionado durante las fechas: (A) 7 de Julio de 2021. (B) 20 de Julio de 2021.

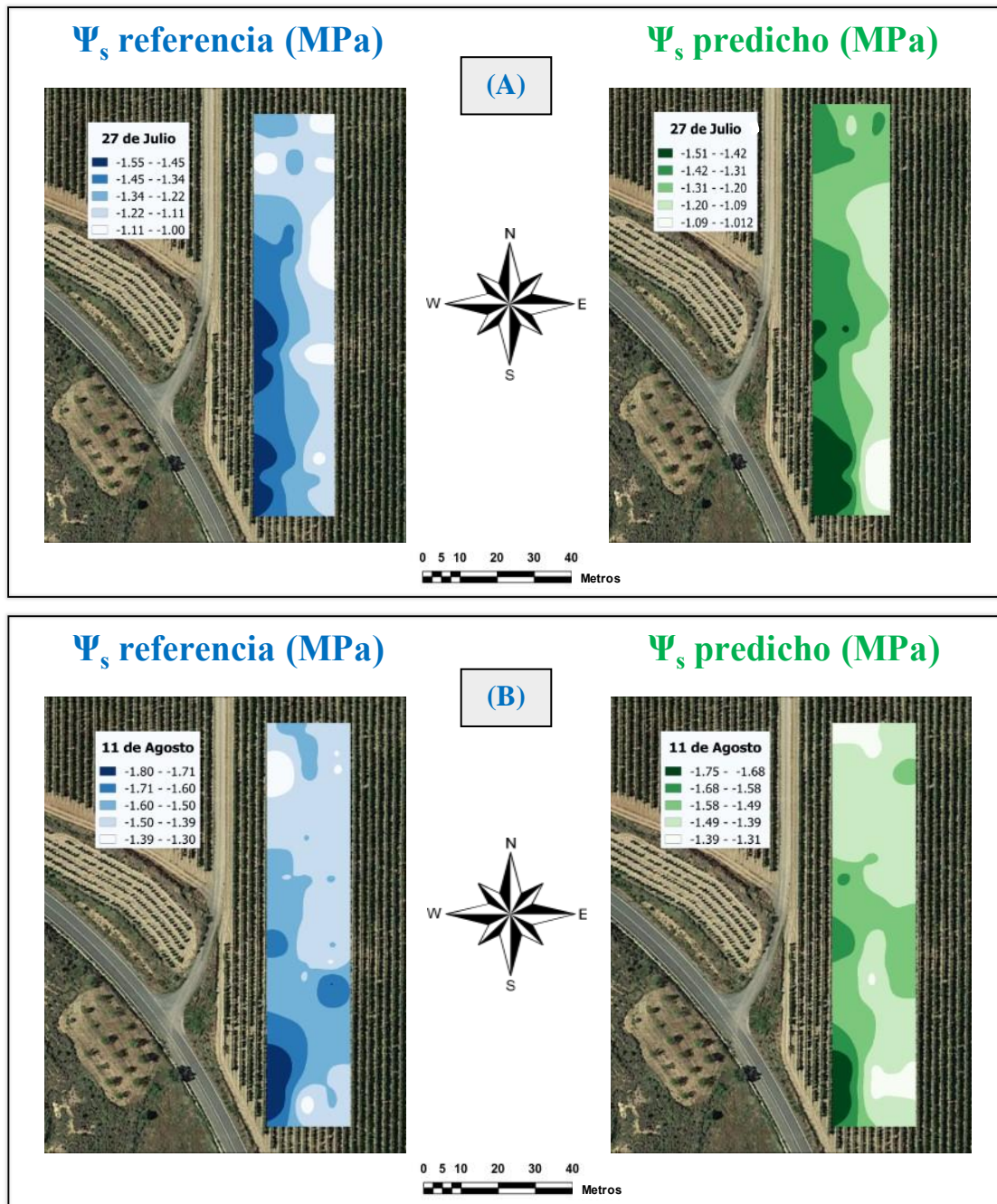


Figura 29. Mapas del estado hídrico del viñedo experimental (I) obtenidos con los valores del método de referencia y por el modelo de regresión PLS seleccionado durante las fechas: (A) 27 de Julio de 2021. (B) 11 de Agosto de 2021.

Con el análisis de las Figuras 28 y 29, se certificó la variabilidad espacio-temporal del viñedo experimental (I) ya que en ambos tipos de mapas (referencia y predichos) se distinguieron subzonas dentro de la misma parcela con diferentes valores de Ψ_{stem} .

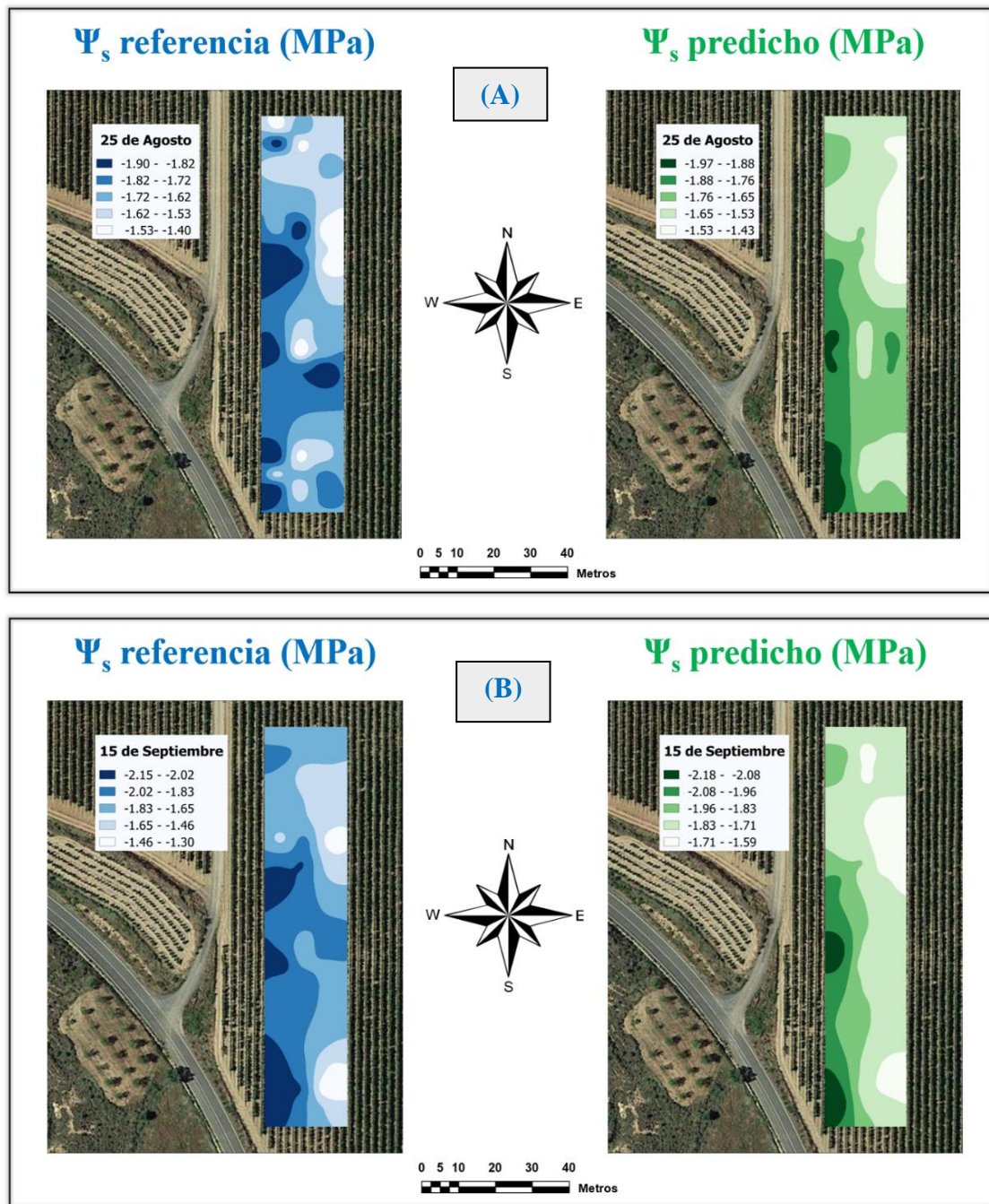


Figura 30. Mapas del estado hídrico del viñedo experimental (I) obtenidos con los valores del método de referencia y por el modelo de regresión PLS seleccionado durante las fechas: (A) 25 de Agosto de 2021. (B) 15 de Septiembre de 2021.

La evolución de los valores de Ψ_{stem} del viñedo experimental (I) representada en las figuras anteriores muestran una tendencia general en la distribución del estado hídrico en la parcela, ubicando las áreas con mayor estrés en la zona suroeste, las áreas con un estrés medio esparcidas por toda la zona central y las áreas con un menor déficit hídrico en las zonas noreste y sureste de la parcela.

El viñedo presentó una evolución homogénea durante todo el proceso de medición a excepción de la fecha del 11 de agosto, ya que debido a problemas con el sistema de riego, mostró la distribución más irregular del estado hídrico en comparación con el resto de fechas. Las áreas con valores más negativos de Ψ_{stem} (representadas de color oscuro en ambos mapas) se ubicaron en las zonas suroeste de forma constante durante todo el proceso de medición. Las zonas que presentaban valores menos negativos de Ψ_{stem} (representadas de color claro en ambos mapas) se ubicaron generalmente en la zona sureste de la parcela. La localización de estas zonas de menor estrés hídrico concuerdan con los tratamientos implementados (Figura 19), ya que la mayoría de réplicas de riego completo y riego medio se situaban en esa región de la parcela.

A mediados de julio se produjeron precipitaciones que afectaron a la distribución del estado hídrico del viñedo, manteniendo valores de Ψ_{stem} muy similares durante ese período y provocando una ligera recuperación de las zonas con mayor estrés hídrico dentro de la parcela durante la primera semana de agosto. El efecto producido por estas precipitaciones se visualiza con un leve cambio en la coloración de los mapas de interpolación, pasando de una tonalidad oscura a otra más clara en las zonas donde habitualmente se localizaba el estrés hídrico de la parcela (Figura 29).

Comparando los mapas de referencia frente a los elaborados mediante el modelo de predicción PLS escogido, se pudo afirmar que la mayoría de los valores de Ψ_{stem} predichos concordaban y fueron similares con los valores de Ψ_{stem} obtenidos mediante el método de referencia. Las zonas de alto, medio y bajo estrés hídrico representadas en los mapas de referencia se ajustaron correctamente con las zonas estimadas por el modelo de predicción PLS.

Los mapas predichos por el modelo escogido presentaron unos intervalos de valores de Ψ_{stem} muy similares a los de referencia, variando mínimamente en todas las fechas de medición (ej. Figura 29 (B): Intervalo más bajo de Ψ_{stem} en el mapa de referencia [-1.39- -1.30 MPa] vs Intervalo más bajo de Ψ_{stem} en el mapa predicho [-1.39- -1.31 MPa]). En la Figura 29 (A), el valor mínimo y máximo de Ψ_{stem} en el mapa de referencia fue de -1.00 y -1.55 MPa mientras que para el mapa predicho por el modelo PLS fue de -1.02 y -1.51 MPa. Por otro lado, en la Figura 30 (A), el valor mínimo y máximo de Ψ_{stem} en el mapa predicho por el modelo PLS fue de -1.43 y -1.97 MPa mientras que en el mapa de referencia fue de -1.40 y -1.90 MPa. La elevada semejanza entre los intervalos y valores de Ψ_{stem} reflejan la robustez del modelo escogido para la monitorización del estado hídrico del viñedo experimental (I).

La variabilidad espacio-temporal de la parcela según el Ψ_{stem} se visualizó de forma muy similar en ambos tipos de mapas y debido a ello, la discriminación de las zonas con un alto y bajo déficit hídrico fueron equiparables, por lo que se justificó la capacidad del sensor y la espectroscopía NIR para estimar la evolución del estado hídrico en la parcela de Tempranillo.

4.3.2. Viñedo experimental (II) [Graciano]

Los mapas de interpolación, tanto de referencia como predichos, para cada una de las fechas de medición correspondientes a la parcela de Graciano se muestran desde la siguiente Figura 31 a la Figura 33.

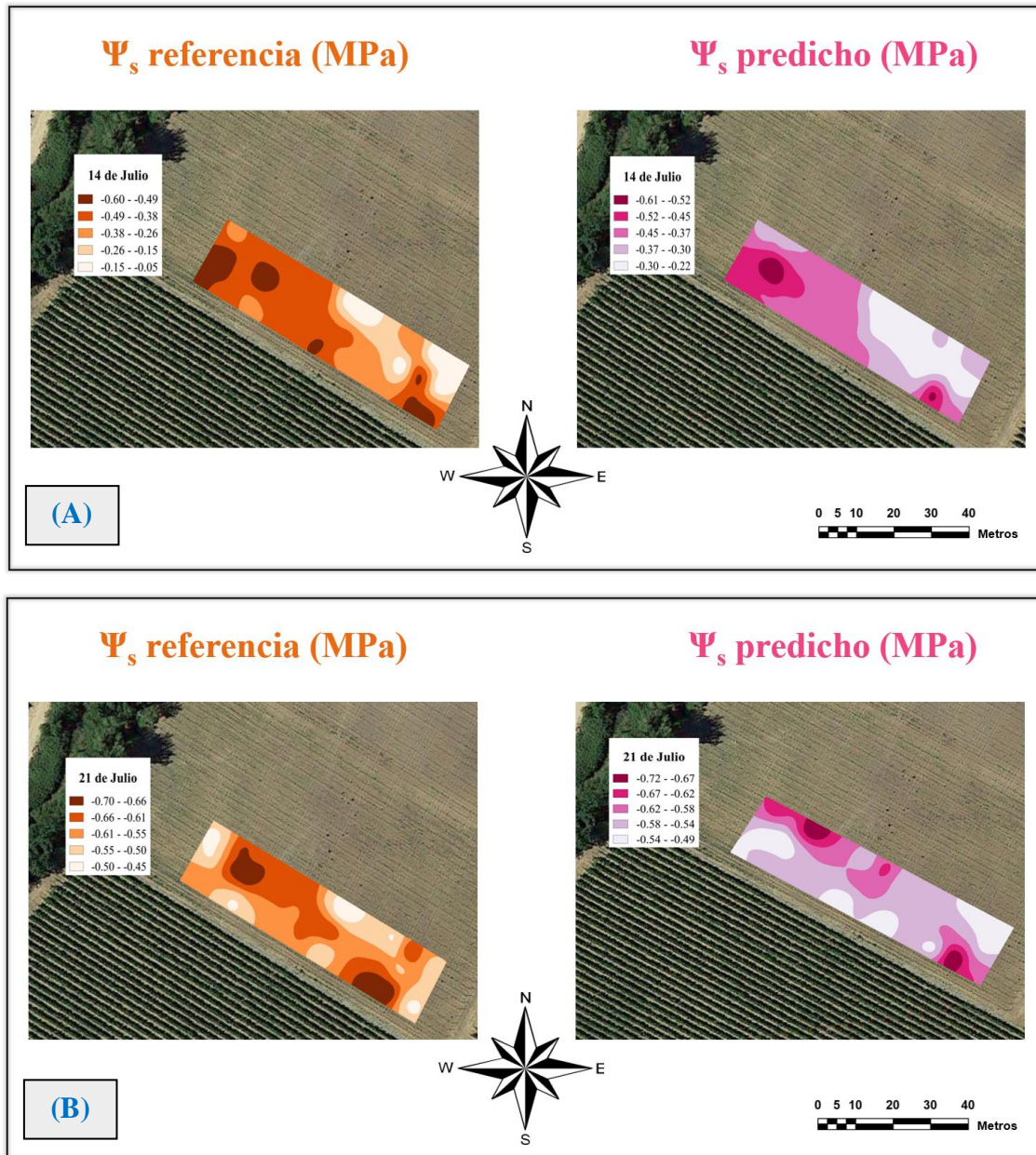


Figura 31. Mapas del estado hídrico del viñedo experimental (II) obtenidos con los valores del método de referencia y por el modelo de regresión PLS seleccionado durante las fechas: (A) 14 de Julio de 2021. (B) 21 de Julio de 2021.

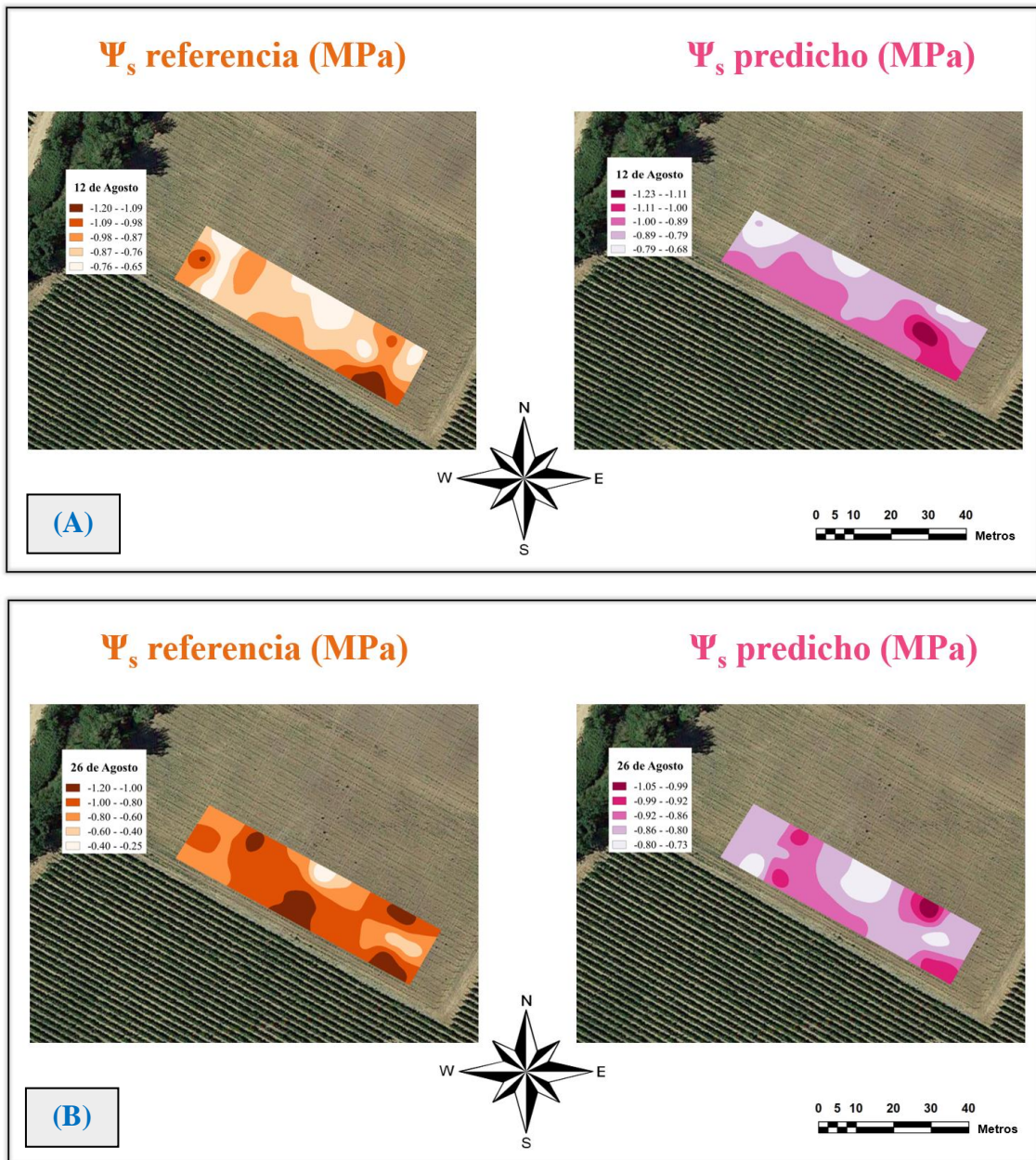


Figura 32. Mapas del estado hídrico del viñedo experimental (II) obtenidos con los valores del método de referencia y por el modelo de regresión PLS seleccionado durante las fechas: **(A)** 12 de Agosto de 2021. **(B)** 26 de Agosto de 2021.

Con el análisis de las Figuras 31 y 32, se certificó la variabilidad espacio-temporal del viñedo experimental (II) ya que en ambos tipos de mapas (referencia y predichos) se distinguieron subzonas dentro de la misma parcela con diferentes valores de Ψ_{stem} .

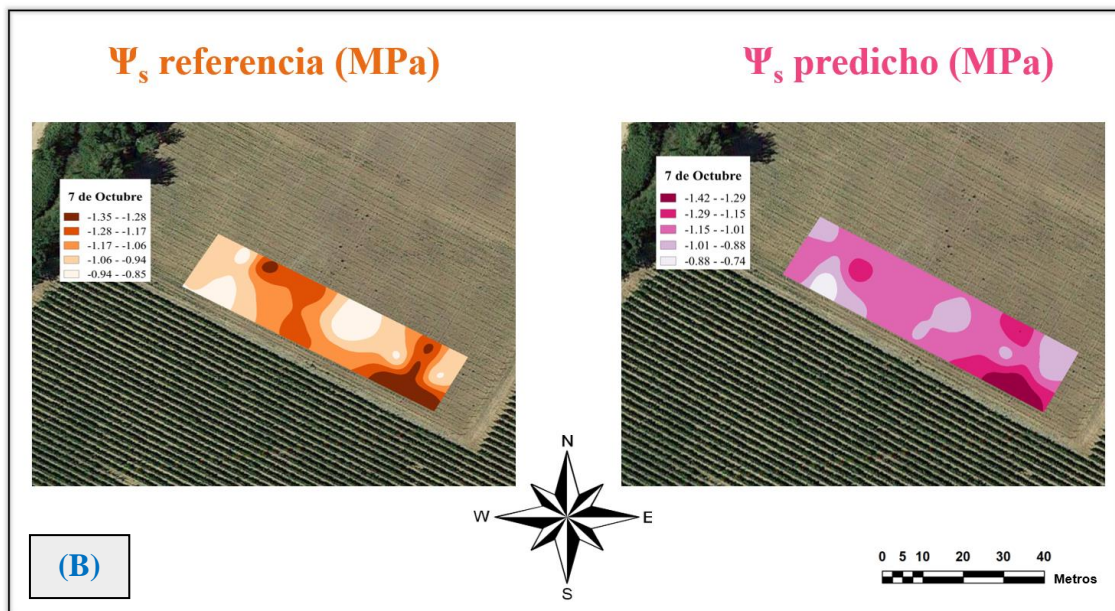
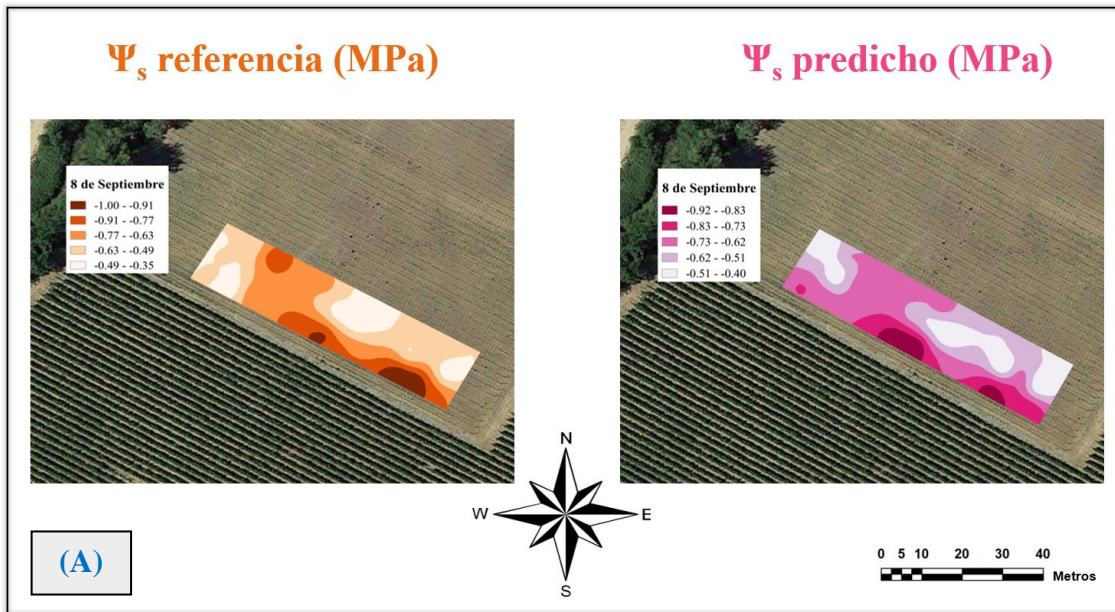


Figura 33. Mapas del estado hídrico del viñedo experimental (II) obtenidos con los valores del método de referencia y por el modelo de regresión PLS seleccionado durante las fechas: (A) 8 de Septiembre de 2021. (B) 7 de Octubre de 2021.

La evolución de los valores de Ψ_{stem} del viñedo experimental (II), sin tener en cuenta las dos primeras fechas de medición (Figura 31), muestran una tendencia general en la distribución del estado hídrico en la parcela, ubicando las áreas con mayor estrés en las zonas sur y noreste, mientras que las áreas con menos estrés se distribuyeron en la cara norte y la cara sur de la parte más alta de la parcela. La Figura 31 no se tuvo en cuenta en la anterior valoración debido a que los valores más negativos de Ψ_{stem} durante las fechas del 14 y 21 de julio no mostraron síntomas de estrés hídrico.

El viñedo presentó una evolución homogénea durante todo el proceso de medición a excepción de las fechas del 26 de agosto y 8 de septiembre, que presentaron una distribución más desigual del estado hídrico en comparación con el resto de fechas, debido a problemas con el sistema de riego y precipitaciones previas acontecidas durante ese periodo de medición. Las zonas que presentaban valores menos negativos de Ψ_{stem} (representadas de color claro en ambos mapas) se ubicaron generalmente en las zonas oeste, norte y este de la parcela. Las áreas con valores más negativos de Ψ_{stem} (representadas de color oscuro en ambos mapas) se ubicaron en las zonas sur y noreste de forma constante durante todo el proceso de medición. La localización de las zonas con mayor estrés hídrico concuerdan con los valores más negativos de Ψ_{stem} obtenidos con el método de referencia en el viñedo experimental (II), ya que se ajustaron a la mayoría de réplicas con el tratamiento sin riego y riego parcial ubicadas en esas áreas de la parcela.

A mediados de julio y principios de septiembre, se produjeron precipitaciones que afectaron a la distribución del estado hídrico del viñedo, provocando una ligera recuperación de las zonas con mayor estrés hídrico dentro de la parcela durante las fechas del 12 de agosto y 8 de septiembre. El efecto producido por estas precipitaciones se visualiza con un leve cambio en la coloración de los mapas de interpolación, pasando de una tonalidad oscura a otra más clara en las zonas de la parcela donde habitualmente se localizaba un estrés hídrico moderado (Figuras 32 (A) y 33 (A)).

Comparando los mapas de referencia frente a los elaborados mediante el modelo de predicción PLS escogido, se pudo afirmar que la mayoría de los valores de Ψ_{stem} predichos coincidían y fueron equiparables con los valores de Ψ_{stem} obtenidos mediante el método de referencia. Las zonas de medio y bajo estrés hídrico representadas en los mapas de referencia se ajustaron correctamente con las zonas estimadas por el modelo de predicción PLS en el viñedo experimental.

Los mapas predichos por el modelo escogido presentaron unos intervalos de valores de Ψ_{stem} muy similares a los de referencia, variando mínimamente en todas las fechas de medición (ej. Figura 32 (A): Intervalo más bajo de Ψ_{stem} en el mapa de referencia [-0.76- -0.65 MPa] vs Intervalo más bajo de Ψ_{stem} en el mapa predicho [-0.79- -0.68 MPa]). En la Figura 33 (A), el valor mínimo y máximo de Ψ_{stem} en el mapa de referencia fue de -0.35 y -1.00 MPa mientras que para el mapa predicho por el modelo PLS fue de -0.40 y -0.92 MPa. Por otro lado, en la Figura 31 (B), el valor mínimo y máximo de Ψ_{stem} en el mapa predicho por el modelo PLS fue de -0.49 y -0.72 MPa mientras que en el mapa de referencia fue de -0.45 y -0.70 MPa. La semejanza entre los intervalos y valores de Ψ_{stem} demostró la solidez del modelo escogido para representar la evolución del estado hídrico en la parcela de Graciano.

La variabilidad espacio-temporal del viñedo experimental (II) según el Ψ_{stem} se visualizó de forma análoga en ambos tipos de mapas y debido a ello, la discriminación de las zonas con un medio y bajo estrés hídrico fueron semejantes, por lo que se vuelve a justificar la capacidad de la metodología empleada para estimar la evolución del estado hídrico en la parcela de Graciano.

Realizando una comparación entre ambos viñedos experimentales, la parcela de Tempranillo presentó unos valores de Ψ_{stem} más negativos que la parcela de Graciano, discriminando un mayor número de zonas con un alto y medio estrés hídrico frente al viñedo experimental (II). Por otra parte, la parcela de Graciano mostró unos niveles inferiores de estrés hídrico, ya que los valores de Ψ_{stem} nunca superaron un nivel de estrés hídrico moderado a pesar de realizarse las mediciones en fechas con una separación mayor en el tiempo. Esta variación en la evolución del estado hídrico entre ambos viñedos experimentales pudo deberse a la variabilidad del suelo entre ambas parcelas o a la diferencia de vigor entre ambas explotaciones vitícolas.

Atendiendo a los mapas de interpolación para cada viñedo experimental en sus respectivas fechas de medición, los mapas de referencia se ajustaron más a los predichos por el modelo PLS en la parcela de Tempranillo. Estos resultados son coherentes con lo desarrollado en este trabajo, ya que el modelo de predicción PLS escogido para el viñedo experimental (I) mostraba unos mejores estadísticos descriptivos que el modelo seleccionado para la parcela de Graciano, por lo que generó predicciones más precisas al utilizar un modelo con menor RMSECV y mayor coeficiente de determinación (R^2_{cv}).

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

1. La espectroscopía NIR proximal adquirida por medio de un vehículo terrestre en movimiento empleada en este trabajo, posibilita la recogida de un gran número de datos de forma rápida y sencilla, facilitando el uso de esta tecnología para la estimación del estado hídrico y la representación de la variabilidad espacio-temporal del viñedo.
2. El presente estudio demuestra la gran capacidad y viabilidad de la utilización del sensor no destructivo y de bajo coste, InSION 1.7 NT/H a través de modelos de regresión multivariante para la monitorización del estado hídrico del viñedo.
3. Los modelos de predicción PLS desarrollados y escogidos para los viñedos experimentales mostraron su robustez al presentar buenos ajustes en la predicción de los valores de Ψ_{stem} , demostrando ser una herramienta útil y fiable para la estimación del estado hídrico de los viñedos comerciales estudiados. El rendimiento de dichos modelos de predicción abre las puertas a una mayor implementación de esta tecnología espectral en la viticultura actual.
4. Los mapas de interpolación elaborados para los mejores modelos de predicción PLS reflejaron una gran similitud entre los valores predichos de Ψ_{stem} y los valores recogidos con el método de referencia en función de la localización de los distintos tratamientos de estrés hídrico establecidos.
5. Los resultados obtenidos con esta metodología posibilitan la monitorización del estado hídrico de forma segura y a un coste económico razonable, otorgando al viticultor la capacidad de gestionar el riego y su explotación de una manera más eficiente, productiva, rentable y sostenible.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Angella, G., Frías, C., & Salgado, R. (2016). Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta. INTA. Buenos Aires-Argentina.
- Bravdo, B., Hepner, Y., Loinger, C., Cohen, S., & Tabacman, H. (1985). Effect of irrigation and crop level on growth, yield and wine quality of Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36(2), 132-139.
- Chartzoulakis, K., & Bertaki, M. (2015). Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 88-98.
- Chaves, M. M., Santos, T. P., Souza, C. D., Ortuño, M. F., Rodrigues, M. L., Lopes, C. M., Maroco, J.P. & Pereira, J. S. (2007). Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Annals of applied biology*, 150(2), 237-252.
- Crippen, D. D., & Morrison, J. C. (1986). The effects of sun exposure on the phenolic content of Cabernet Sauvignon berries during development. *American Journal of Enology and Viticulture*, 37(4), 243-247.
- Diago MP, Bellincontro A, Scheidweiler M, Tardaguila J, Tittmann S & Stoll M (2017) Future opportunities of proximal near infrared spectroscopy approaches to determine the variability of vineyard water status. *Australian journal of grape and wine research* 23: 409-414.
- Diago MP, Fernández-Novales J, Gutiérrez S, Marañón M & Tardaguila J (2018). Development and validation of a new methodology to assess the vineyard water status by on-the-go near infrared spectroscopy. *Frontiers in plant science* 9: 59.
- Diago, M. P., Arpón, L., Andrés-Cabello, S., Bengoechea, C. (2020) Global warming effects on grapegrowing climate zones within the Rioja appellation (DOC Rioja) in north Spain. XIII International Terroir Congress, 2020 Adelaide (Australia).
- Diago, M.P. (2022) Vineyard water management. In: *Advanced Automation for Tree Fruit Orchards and Vineyards*. Stavros Vougioukas, Qin Zhang (Eds.). Springer (to be released in Fall 2022)
- Dry, P. R., & Loveys, B. R. (1998). Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Australian journal of grape and wine research*, 4(3), 140-148.
- Dry, P. R., Loveys, B. R., & Düring, H. (2000). Partial drying of the rootzone of grape. II. Changes in the pattern of root development. *Vitis*, 39(1), 9-12.
- Dry, P. R., Loveys, B. R., McCarthy, M. G., & Stoll, M. (2001). Strategic irrigation management on Australian vineyards. *Progrès Agricole et Viticole* (France).
- Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., ... & Wissler, D. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239-3244.
- Escalona, J. M., Tomás, M., Ribas-Carbó, M., Bechir, A., Bota, J., Santesteban, L. G., ... & Medrano Gil, H. (2014). El ratio isotópico del carbono ($\delta^{13}C$) como indicador válido de la eficiencia en el uso del agua en vid. In *I Jornadas del Grupo de Viticultura y Enología de la SECH-Retos Actuales de I+ D en Viticultura* 126 (pp. 126-132). SECH.
- Esteban, M. A., Villanueva, M. J., & Lissarrague, J. R. (2001). Effect of irrigation on changes in the anthocyanin composition of the skin of cv Tempranillo (*Vitis vinifera* L) grape berries during ripening. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(4), 409-420.
- Ezzahouani, A., Valancogne, C., Pieri, P., Amalak, T., & Gaudillère, J. P. (2007). Water economy by Italia grapevines under different irrigation treatments in a Mediterranean climate. *OENO One*, 41(3), 131-139.

- Fernández, J. E. (2014). Plant-based sensing to monitor water stress: Applicability to commercial orchards. *Agricultural water management*, 142, 99-109.
- Fernández-Navales, J. (2009). Determinación de parámetros de calidad de uvas, mostos en fermentación y vinos mediante espectroscopía ultravioleta-visible y de infrarrojo cercano. [Tesis doctoral, Universidad de Córdoba]. Repositorio Académico de la Universidad de La Rioja. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=54975>.
- Fernández-Navales, J., Saiz-Rubio, V., Barrio, I., Rovira-Más, F., Cuenca-Cuenca, A., Santos Alves, F., ... & Diago, M. P. (2021). Monitoring and mapping vineyard water status using non-invasive technologies by a ground robot. *Remote Sensing*, 13(14), 2830.
- Fernández-Navales, J., Tardaguila, J., Gutiérrez, S., Marañón, M., & Diago, M. P. (2018). In field quantification and discrimination of different vineyard water regimes by on-the-go NIR spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 165, 47-58.
- Ferreira, M. I., Paço, T. A., Silvestre, J., & Silva, R. M. (2008). Evapotranspiration estimates and water stress indicators for irrigation scheduling in woody plants. *Agricultural water management research trends*, 129-170.
- Gutiérrez, S., Diago, M. P., Fernández-Navales, J., & Tardaguila, J. (2018). Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learning. *PLoS One*, 13(2), e0192037.
- Gutiérrez, S., Fernández-Navales, J., Diago, M. P., Iñiguez, R., & Tardaguila, J. (2021). Assessing and mapping vineyard water status using a ground mobile thermal imaging platform. *Irrigation Science*, 39(4), 457-468.
- Hardie, W. J., & Considine, J. A. (1976). Response of grapes to water-deficit stress in particular stages of development. *American Journal of Enology and Viticulture*, 27(2), 55-61.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter Jr, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural meteorology*, 24, 45-55.
- Jones, G. V., & Alves, F. (2012). Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro Valley of Portugal. *International Journal of Global Warming*, 4(3-4), 383-406.
- Jones, H. G., & Grant, O. M. (2015). Remote sensing and other imaging technologies to monitor grapevine performance. *Grapevine in a changing environment: a molecular and ecophysiological perspective*. West Sussex: Wiley, 179-201.
- Jones, H. G., Stoll, M., Santos, T., Sousa, C. D., Chaves, M. M., & Grant, O. M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of experimental botany*, 53(378), 2249-2260.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of experimental botany*, 55(407), 2427-2436.
- Lissarrague Garcia-Gutierrez, J. R., López Pavón, C., & Rodríguez Fernández, L. (2012). Consecuencias de la aplicación del riego para atenuar los efectos del calentamiento global en el viñedo. *Agricultura Revista Agropecuaria*, 953(8), 504-508.
- Martínez De Toda, F. (2019). Técnicas vitícolas frente al cambio climático. Mundi-Prensa Libros.
- Martínez, T. L., Sáenz, C. B., Cortijos-López, M., Romero, M. E. N., Rueda, I. M., & Domínguez, E. G. E. (2022). Estrategias de adaptación al cambio climático en el viñedo de la cuenca mediterránea: el caso del Rioja. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*, (48), 133-156.
- McCarthy, M. G. (1997). The effect of transient water deficit on berry development of cv. Shiraz (*Vitis vinifera* L.). *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 3(3), 2-8.
- Medrano, H., Escalona, J. M., Bota, J., Gulí'as, J., & Flexas, J. (2002). Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany*, 89(7), 895e905.

- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J. M., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J. & Bota, J. (2015). Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 499-517.
- Nicolai, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I., & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest biology and technology*, 46(2), 99-118.
- Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A., & Deloire, A. (2002). Influence of pre-and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American journal of Enology and Viticulture*, 53(4), 261-267.
- Ojeda, H., Deloire, A., & Carbonneau, A. (2001). Influence of water deficits on grape berry growth. *VITIS-GEILWEILERHOF-*, 40(3), 141-146.
- Ortuño, M. F., Conejero, W., Moreno, F., Moriana, A., Intrigliolo, D. S., Biel, C., ... & Torrecillas, A. (2010). Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97(1), 1-11.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20.
- Rodríguez Fernández, M., González Vázquez, X. P., Fandiño Beiro, M., & Cancela Barrio, J. J. (2020). Determinación del estado hídrico del viñedo mediante el uso de imágenes térmicas y su influencia en la calidad y producción de la uva.
- Rodríguez-Pérez, JR., Riaño, D., Carlisle, E., Ustin, S. and Samart, D. R. 2007. Evaluation of hyperspectral reflectance indexes to detect grapevine water status in vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, vol. 58 (3), pages 302-317.
- Sánchez, P. R. (2015). *Viticultura y Cambio Climático en España: Vulnerabilidad en las distintas regiones y estrategias de adaptación frente al desarrollo de nuevas políticas*. Recuperado de http://oa.upm.es/37877/1/PABLO_JOSE_RESCO_SANCHEZ.pdf
- Santesteban LG, Miranda C & Royo JB (2009) Effect of water deficit and rewatering on leaf gas exchange and transpiration decline of excised leaves of four grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae* 121: 434-439.
- Santesteban, L. G., Di Gennaro, S. F., Herrero-Langreo, A., Miranda, C., Royo, J. B., & Matese, A. (2017). High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. *Agricultural Water Management*, 183, 49-59.
- Santesteban, L. G., Miranda, C., Marín, D., Sesma, B., Intrigliolo, D. S., Mirás-Avalos, J. M., ... & Royo, J. B. (2019). Discrimination ability of leaf and stem water potential at different times of the day through a meta-analysis in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*, 221, 202-210.
- Sepúlveda-Reyes, D., Ingram, B., Bardeen, M., Zúñiga, M., Ortega-Farías, S., & Poblete-Echeverría, C. (2016). Selecting canopy zones and thresholding approaches to assess grapevine water status by using aerial and ground-based thermal imaging. *Remote Sensing*, 8(10), 822.
- Shenk JS and Westerhaus MO, Routine Operation, Calibration, Development and Network System Management Manual. NIR Systems Inc., Silver Spring, MD (1995).
- Smart, R. E. (1974). Aspects of water relations of the grapevine (*Vitis vinifera*). *American Journal of Enology and Viticulture*, 25(2), 84-91.
- Togores, J. H., & Fernández-Cano, L. H. (2011). *Tratado de viticultura I (Vol. 1 y Vol.2)*. Mundi-Prensa Libros.
- Williams, P. C. (2001). Implementation of near-infrared technology. *Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*, 2, 145e169.
- Yuste J, Vicente A & Martínez-Porro D (2018). Consequences of the application of different irrigation doses on grape yield, vegetative development and quality in cv. Cabernet Sauvignon in the Duero river valley. *E3S Web of Conferences* 50, 01007.