



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Monitorización no invasiva del vigor y del estado hídrico del viñedo desde un vehículo autónomo.

Autor/es

ESTHER TORRES MONTES

Director/es

MARÍA PAZ DIAGO SANTAMARÍA y JUAN FERNÁNDEZ NOVALES

Facultad

Escuela de Máster y Doctorado de la Universidad de La Rioja

Titulación

Máster Universitario en Tecnología, Gestión e Innovación Vitivinícola

Departamento

AGRICULTURA Y ALIMENTACIÓN

Curso académico

2019-20



Monitorización no invasiva del vigor y del estado hídrico del viñedo desde un vehículo autónomo., de ESTHER TORRES MONTES
(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.

Trabajo de Fin de Máster

MONITORIZACIÓN NO INVASIVA DEL VIGOR Y DEL ESTADO HÍDRICO DEL VIÑEDO DESDE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO

Autora

Esther Torres Montes

Tutores: M^a Paz Diago Santamaría
Juan Fernández Novales

MÁSTER:

Máster en Tecnol., Gest. e Inn. Vitivinícola (761)

Escuela de Máster y Doctorado



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

AÑO ACADÉMICO: 2019/2020

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 IMPORTANCIA DE LA VITICULTURA.....	1
1.2 CONTEXTO Y RETOS ACTUALES DE LA VITICULTURA	3
I. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	4
II. EL RETO DE LA SOSTENIBILIDAD.....	5
1.3 EL RIEGO COMO HERRAMIENTA PARA UNA VITICULTURA SOSTENIBLE.....	7
1.4 EL AGUA COMO RECURSO NATURAL	8
1.5 ESTADO HÍDRICO DEL VIÑEDO.....	9
1.6 PRINCIPALES MÉTODOS DE MEDIDA DEL ESTADO HÍDRICO.....	11
1.6.1 Métodos basados en la determinación de la humedad del suelo.....	11
I. MEDICIÓN DIRECTA DE LA HUMEDAD DEL SUELO.....	11
a) Método gravimétrico	11
II. MEDICIÓN INDIRECTA DE LA HUMEDAD DEL SUELO	12
a) Dispersión de neutrones.....	12
b) Sensores de capacitancia.....	13
c) Medida del potencial hídrico del suelo.....	14
1.6.2 Métodos basados en la demanda atmosférica.....	16
1.6.3 Métodos basados en la medida directa de la planta	17
a) Medida del potencial hídrico (Ψ).....	17
b) Conductancia estomática (gs)	19
c) Dendrometría.....	20
d) Flujo de savia.....	22
1.7 NUEVOS METODOS DE MEDIDA NO INVASIVOS.....	23
1.7.1 Espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS).....	24
1.7.2 Termografía	28
1.8 EL VIGOR DE LA CEPA	33
1.8.1 Definición y principales implicaciones vitícolas	33
1.8.2 Métodos de medida del vigor.....	34
1.8.1.1 Métodos clásicos de la medida del vigor del viñedo	35
I. PESO DE LA MADERA DE PODA O PESO DEL SARMIENTO.....	35
II. LONGITUD DEL SARMIENTO.....	35

III. MEDIDA DEL DIÁMETRO MÁXIMO DEL ENTRENUDO	35
1.8.2.2 Métodos no invasivos de medida del vigor del viñedo	36
I. MEDIDA DE LA FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA.....	36
II. ÍNDICES ESPECTRALES DE VEGETACIÓN	38
a) NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)	39
1.9 VEHÍCULOS AUTÓNOMOS EN AGRICULTURA.....	47
1.9.1 ¿Por qué utilizar vehículos autónomos en agricultura?	49
2. OBJETIVOS	53
3. MATERIALES Y MÉTODOS	55
3.1 VIÑEDO EXPERIMENTAL.....	55
3.2 MEDICIÓN NO INVASIVA DEL ESTADO HÍDRICO Y VIGOR DE LA CEPA SENSORES EMPLEADOS	57
3.2.1 Medición del estado hídrico	57
3.2.2 Medición del vigor.....	57
3.3 VEHÍCULO AUTÓNOMO (ROBOT).....	59
3.4 MEDIDAS DE REFERENCIA.....	60
3.4.1 Medición del estado hídrico	60
3.4.2 Medida del vigor y estado nutricional.....	61
3.5 DATOS ESTACIÓN METEOROLÓGICA	62
3.6 ANÁLISIS DE DATOS.....	62
3.6.1 Generación de modelos matemáticos	63
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
4.1 ESTADO HÍDRICO DEL VIÑEDO.....	65
a) Diagramas boxplot.....	65
b) Modelos de correlación simple	66
c) Modelos análisis multivariante	71
4.2 VIGOR DEL VIÑEDO	83
a) Diagramas boxplot.....	83
b) Modelos de correlación simple	85
8. CONCLUSIONES	93
9. BIBLIOGRAFÍA	95

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Equipo para medir la dispersión de neutrones mediante sonda. Fuente: INTA EEASE (2011)	13
Figura 2. Equipo de medida de la capacitancia del suelo mediante dos electrodos separados. Fuente: www.viarural.com.ar	14
Figura 3. Imagen del tensiómetro para medir el potencial hídrico del suelo y esquema de colocación. Fuente: www.irrometer.com	15
Figura 4. Imagen de un equipo para medir el potencial hídrico del suelo mediante resistencia eléctrica del tipo Watermark, en el que los dos electrodos van encajados dentro de una matriz granular. Fuente: INTA EEASE (2011)	16
Figura 5. Imagen de cámara de Scholander o de presión integrada en una caja transportable. Para su funcionamiento necesita una bomba externa de aire comprimido. Fuente: https://www.mmm-tech.de/es	18
Figura 6. Porómetro tomando medida de la conductancia estomática, detalle de colocación de la pinza del porómetro a la hoja. Fuente www.lapacacr.com	19
Figura 7. Medidor portátil de intercambio de gases LICOR Modelo LI-6400, además de utilizarlo para medir la conductancia estomática se usa también como medidor de fotosíntesis. Fuente: https://www.licor.com	20
Figura 8. Dendrómetro instalado en tronco de vid . Fuente: www.vitivinicultura.es	21
Figura 9. Esquema de la colocación del sensor de flujo de savia con el calentador en el centro y los dos sensores de temperatura arriba y abajo. Fuente: www.lapacacr.com	23
Figura 10. Equipo de espectroscopía portátil de contacto microPHAZIR RXAnalyzer (1600 -2400 nm) para realizar mediciones de manera no invasiva, rápida y fiable. Fuente: www.thermofisher.com	25
Figura 11. Equipo de espectroscopía a distancia Polytec NIR PSS para mediciones en continuo con capacidad para obtener gran número de medidas. Se puede instalar en cualquier vehículo capaz de avanzar por las filas del viñedo. Fuente: www.directindustry.es	26
Figura 12. Espectro de absorción de la clorofila en las diferentes longitudes de onda. Fuente: www.droncontrol.com	37
Figura 13. Medidor óptico Dualex. Medidor de pinza portátil que permite medir los índices de clorofila y otros parámetros de las hojas. Se pueden registrar más de 10.000 mediciones, permite exportar datos y georreferenciar las muestras. Fuente: www.gabsystem.com	38
Figura 14. Respuestas espectrales típicas de la vegetación y del suelo. En el espectro visible (400-700nm) reflectancia muy baja debido a la absorción de pigmentos fotosintéticos. En la región del infrarrojo cercano de onda corta (700-1300nm) la reflectancia es alta y en la región del infrarrojo medio de onda corta (1400-3000 nm) la reflectancia es media debido a la absorción del agua y otros compuestos. Fuente: Tanda y Chiarabiani (2019)	42
Figura 15. Cálculo NDVI. Valores próximos a la unidad son propios de plantas vigorosas y valores más cercanos a cero son plantas con bajo vigor. Fuente: www.earthobservatory.nasa.gov	43

Figura 16. N-Sensor de Yara. (a) El sensor para el cálculo de los índices vegetativos va montado en el techo de tractor. (b) Detalle del sensor. Fuente: Yara Internacional.....	45
Figura 17. (a) Montaje de sensores GreenSeeker en el frente de la maquinaria. (b) Detalle de sensor, el cual es ubicado en forma perpendicular al cultivo. Fuente: Vellidis y Lincopresicion.....	46
Figura 18. (a) Montaje de sensores CropCircle en maquinaria. (b) Detalle del sensor, el cual es ubicado en forma perpendicular al cultivo. Fuente: Schepers.....	47
Figura 19. Ventajas en inconvenientes de la instalación de sensores en plataformas terrestres tripuladas (vehículos no autónomos). Fuente: Gutierrez S. (2019) PhD Tesis.....	49
Figura 20. Imágenes de algunos prototipos de vehículos autónomos a) Wall-Ye (wall-ye.com), b) GRAPE (grape-project.eu), c) VinBot (vinbot.eu), d) VineScout (vinescout.eu). Fuente: Shamshiri <i>et al.</i> , 2018 y http://vinescout.eu/	51
Figura 21. VineRobot (vinerobot.eu). Fuente: http://www.vinerobot.eu/	51
Figura 22. Finca en Quinta do Ataíde, Junqueira, Julio de 2018. Selección de las filas para el diseño del estudio. Los colores azules representan valores de alto vigor mientras los amarillos a rojos valores de bajo vigor.....	56
Figura 23. Bloques seleccionados en el estudio experimental. En cada una de las filas se marcaron los mismos bloques.....	56
Figura 24. Sensor radiométrico infrarrojo SI-421 (Apogee instrument Inc., Utah, EE. UU)	57
Figura 25. Figura 24: OCITM – M Cámara Multiespectral con 8 bandas espectrales (470 nm, 560 nm, 670 nm, 720 nm, 780 nm, 840 nm, 900 nm and 970 nm).....	58
Figura 26. Sensores no invasivos montados en VineScout: radiómetro infrarrojo para medir la temperatura de la vegetación y evaluar el estado hídrico y cámara multiespectral para evaluar el vigor de la vid.....	58
Figura 27. Imagen del robot VineScout preparado para la toma de datos en viñedo en Quinta do Ataíde, Junqueira (Portugal)	60
Figura 28. Esquema de medida del potencial hídrico de hoja. Medición de 3 hojas por cada uno de los diez bloques pertenecientes a las cinco filas de estudio	61
Figura 29. Esquema de medida de los índices de referencia del Vigor y el estado nutricional. Medición de 4 hojas por cada uno de los diez bloques pertenecientes a las tres filas de estudio	61
Figura 30. Métodos de referencia para medir el vigor y el estado nutricional de la vid: (a) Plant Pen NDVI 300, (b) Force-A Dualex Scientific.	62
Figura 31. Diagramas boxplot de la temperatura de la vegetación, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.....	65
Figura 32. Diagramas boxplot del potencial hídrico (MPa), (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.....	66
Figura 33. Correlaciones del 18/07/19, (a) entre la T ^a de la vegetación y el potencial hídrico (MPa), (b) entre el índice CWSI y el potencial hídrico (MPa) (c) entre el índice Ig y el potencial hídrico (MPa)	68
Figura 34. Correlaciones del 19/07/19, (a) entre la T ^a de la vegetación y el potencial hídrico (MPa), (b) entre el índice CWSI y el potencial hídrico (MPa) (c) entre el índice Ig y el potencial hídrico (MPa)	69

Figura 35. Correlaciones de los días 18y19/07/19, (a) entre la T ^a de la vegetación y el potencial hídrico (MPa), (b) entre el índice CWSI y el potencial hídrico (MPa) (c) entre el índice Ig y el potencial hídrico (MPa). 70	Figura 36.
Análisis multivariante de 8 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG, T ^a aire, humedad relativa), 18 de julio 2108	72
Figura 37. Análisis multivariante de 6 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG), 18 de julio 2108	73
Figura 38. Análisis multivariante de 4 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, T ^a aire, humedad relativa), 18 de julio 2108	73
Figura 39. Análisis multivariante de 3 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, CWSI), 19 de julio 2108	74
Figura 40. Análisis multivariante de 8 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG, T ^a aire, humedad relativa), 19 de julio 2108	75
Figura 41. Análisis multivariante de 6 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, mediana, desviación, T ^a aire, humedad relativa), 19 de julio 2108.....	76
Figura 42. Análisis multivariante de 4 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, mediana, desviación), 19 de julio 2108.....	77
Figura 43. Análisis multivariante de 3 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, desviación), 19 de julio 2108.....	77
Figura 44. Análisis multivariante de 8 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG, T ^a aire, humedad relativa), 18 y 19 de julio.....	79
Figura 45. Análisis multivariante de 6 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG), 18 y 19 de julio	80
Figura 46. Análisis multivariante de 4 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, mediana, desviación), 18 y 19 de julio	80
Figura 47. Análisis multivariante de 3 variables (NDVI robot, T ^a media vegetación, desviación), 18 y 19 de julio.....	81
Figura 48. Diagramas boxplot del NDVI robot, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.....	83
Figura 49. Diagramas boxplot del NDVI de referencia, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto	84
Figura 50. Diagramas boxplot de CHL, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto	84
Figura 51. Diagramas boxplot de NBI, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto	85
Figura 52. Correlaciones para el día 18/07/18 entre NDVI robot y (a) NDVI referencia, (b) CHL y (c) NBI.	87
Figura 53. Correlaciones para el día 19/07/18 entre NDVI robot y (a) NDVI referencia, (b) CHL y (c) NBI.	88
Figura 54. Correlaciones para el día 18y19/07/18 entre NDVI robot y (a) NDVI referencia, (b) CHL y (c) NBI.	90
Figura 55. Evolución de las medidas de NDVI recogidas con el robot y el método de referencia (a) el día 18/07/2018 y (b) el día 19/07/18	91

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Potenciales efectos del Cambio Climático (Resco <i>et al.</i> , 2014)	5
Tabla 2. Índices de vegetación (VI), adaptado de (Rodríguez-Pérez <i>et al.</i> , 2007)	40
Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el NDVI robot y las medidas de referencia tomadas para la estimación del vigor el día 18/07/2018.....	86
Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el NDVI robot y las medidas de referencia tomada para la estimación del vigor el día 19/07/2018.....	86
Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el NDVI robot y las medidas de referencia tomada para la estimación del vigor los días 18y19/07/2018.....	89

RESUMEN:

El cambio climático es uno de los grandes retos del sector vitivinícola, por lo que se hace cada vez más necesario el desarrollo de una viticultura sostenible. La mayor escasez de agua y el aumento de las temperaturas hacen que tenga más importancia disponer de indicadores fiables del estrés hídrico como herramientas de gestión del riego.

El objetivo de este trabajo es la monitorización no invasiva del viñedo para la determinación del estado hídrico y vigor del mismo. Esta monitorización se llevó a cabo desde un vehículo autónomo en el que se instalaron un sensor radiométrico, que midió la temperatura de la vegetación para la evaluación del estado hídrico, y una cámara multiespectral, que recogió imágenes de la vegetación para la evaluación del vigor. El trabajo experimental se llevó a cabo en un viñedo comercial en Quinta do Ataíde (Junqueira, Portugal) durante los días 18 y 19 de julio en la temporada 2018. Para el tratamiento de los datos, se realizaron correlaciones lineales entre los datos del potencial hídrico con la temperatura de la vegetación, y con diferentes índices térmicos. Para mejorar las bajas correlaciones obtenidas, se realizó también un análisis multivariante teniendo en cuenta variables externas. De esta manera se obtuvieron mejores correlaciones entre el potencial hídrico medido con la cámara de Scholander y el potencial hídrico predicho. Para el tratamiento de los datos del vigor, se realizaron correlaciones lineales entre los datos de NDVI obtenidos por el robot mediante la cámara multiespectral y las medidas de referencia del estado nutricional, obteniendo valores de correlación débiles.

Como conclusión general se demostró que es posible la adquisición de un gran número de medidas de manera autónoma, no destructiva y en un corto espacio de tiempo. Asimismo, a pesar de que las correlaciones obtenidas en los modelos no fueron lo suficientemente fuertes como para establecer una cuantificación, sí permiten realizar una clasificación intra-parcela en función del estado hídrico y vigor del cultivo sin necesidad de cuantificar sus valores en términos absolutos.

ABSTRACT:

Climate change is one of the major challenges facing the wine sector and the development of sustainable viticulture is therefore increasingly necessary. Increased water scarcity and rising temperatures make reliable water stress indicators more important as irrigation management tools.

The objective of this work is to non-invasively monitor for the estimation of vineyard water status and plant vigour. This monitoring was carried out from an autonomous vehicle in which a radiometric sensor was installed, which measured the temperature of the canopy for the evaluation of the water status, and a multispectral camera, which collected images of the canopy for the evaluation of the vigour. The experimental work was conducted in a commercial vineyard in Quinta do Ataíde (Junqueira, Portugal) during July 18 and 19 in the 2018 season. Regarding data analysis, linear correlations were made between the water potential data and the canopy temperature, and with different thermal indexes. To improve the low correlations obtained, a multivariate analysis was also carried out taking into account external variables. In this way, better correlations were obtained between the water potential measured with the Scholander chamber and the predicted water potential. As for vigour data, linear correlations were built between the NDVI data obtained by the robot with the multispectral camera and the reference measurements of nutritional status, yielding weak correlation values.

The overall conclusion was that the acquisition of a large number of measurements is possible in an autonomous, non-destructive way and in a short period of time. Moreover, despite the fact that the correlations obtained in the models were not strong enough to set up a quantification, vineyard classification according to the water status and vigour without the necessity of quantifying its values in absolute terms is feasible.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 IMPORTANCIA DE LA VITICULTURA

La superficie de viñedo cultivada a nivel mundial en 2017 fue de 7,6 millones de hectáreas según datos de la OIV (coyuntura de abril del 2018). De los que 3,3 millones de hectáreas son de viñedo comunitario (países dentro de la UE).

España, es el país europeo que cuenta con mayor superficie de viñedo plantado, 967 mil hectáreas en 2017. Este viñedo es el destinado a la producción de uvas de vinificación, uvas de mesa o uvas pasas, en fase de producción o todavía improductivos.

Fuera de Europa, es China el país que cuenta con mayor superficie plantada. Alcanzando en ese mismo año 2017 las 810 mil hectáreas.

En cuanto a la producción de vino se refiere, la producción mundial en 2017 (excluidos zumos y mostos) alcanzó los 250 millones de hectólitros. De estos, 141 millones fueron de países de la Unión Europea y de España en concreto, 32,1 millones de hectólitros. Con estas cifras, España se sitúa como tercer país productor de vino a nivel mundial precedido por Francia e Italia.

La vid ocupa el tercer lugar en extensión de los cultivos españoles, detrás de los cereales y el olivar, y su superficie se extiende por todas las Comunidades Autónomas. En Castilla La Mancha se concentra la mitad de la superficie vitícola del país (datos MAPAMA 2016). El 88% de la superficie plantada de viñedo está protegida por Denominación de Origen Protegida (DOP) y el 7% por Indicación Geográfica Protegida (IGP) y queda para producción de vinos sin Indicación Geográfica solo el 5% de la superficie de viñedo del país.

La superficie de viñedo se distribuye en 546.398 explotaciones (Inventario vitícola 2016) de las que la superficie media de cada explotación es de 1,75 hectáreas.

La industria vitivinícola española, empleaba según datos del INE 2105 a 23.743 personas que suponen un 6,72% del total empleado por la industria agroalimentaria.

En cuanto a las exportaciones de vino y según datos de la OIV, suponen entre el 11% y 13% del valor de las exportaciones del sector agroalimentario. España lidera el comercio exterior de vino ocupando la primera posición entre los exportadores mundiales de vino en términos de volumen y la tercera posición como exportador mundial en términos de valor.

En lo que se refiere a la Denominación de Origen Calificada Rioja (D.O.Ca Rioja), cabe destacar que sigue una evolución creciente de su capacidad productiva, comercializadora y económica. En los últimos 25 años el número de bodegas de crianza se ha multiplicado por cinco, al igual que las que poseen registro embotellador (Barco 2008). Se consolida el crecimiento sobre la base de un modelo tradicional en el que conviven grandes, pequeñas y medianas bodegas alcanzando la cifra de más de 600, con 14.800 viticultores y el mayor parque de barricas del mundo, según cifras del Consejo Regulador D.O. Ca Rioja.

Según esta misma fuente, en 2018 se dedicaron al cultivo de la vid en la D.O. Ca Rioja 65.001 hectáreas. De las que 45.001 hectáreas se sitúan en el C.A. de La Rioja, 12.979 hectáreas en Álava y 7.021 hectáreas en la Comunidad Foral de Navarra.

Dentro del sector elaborador, coexisten 272 cosecheros, 37 cooperativas, 91 almacenistas y 381 criadores. Son diferentes modelos empresariales de bodegas que conviven, con unas dimensiones físicas y económicas muy diversas. De los casi 17 millones de litros elaborados en 2018, cerca de 12 millones lo elaboraron los criadores con un parque de 1.385.000 barricas.

El principal país al que se dirigen las exportaciones de la D.O.Ca Rioja es Reino Unido, seguido de Alemania y Estado Unidos.

1.2 CONTEXTO Y RETOS ACTUALES DE LA VITICULTURA

El objetivo principal de toda plantación de viñedo es la producción de uva de calidad. Sobre la premisa de la calidad, se establece el diseño de la plantación vitícola. Para ello se consideran unas condiciones de partida como fijar los objetivos económicos que se persiguen. Posteriormente, se analizarán aspectos agronómicos relacionados con la zona de plantación (oroografía, topografía, tipo de suelo, disponibilidad hídrica y las características climatológicas). Con esta información, lo más aconsejable sería establecer el cultivo en unidades lo más homogéneas posible, de cara a optimizar la gestión de la plantación.

Actualmente, además de todo ello, la viticultura se enfrenta a una serie de retos como son el incremento de la población mundial, la concentración de la población en ciertas zonas del planeta, la aparición de nuevos hábitos y gustos de consumo, pero, sobre todo, a la viticultura le afectan las consecuencias del cambio climático y por ende la necesidad de realizar una viticultura más sostenible.

La mayor parte del cultivo de la vid se encuentra en regiones semiáridas con sequía estacional (climas de tipo mediterráneo) donde el déficit hídrico atmosférico junto con las altas temperaturas, ejercen grandes restricciones en el rendimiento (Pou *et al.*, 2014).

El problema del agua es el más importante para la sostenibilidad medioambiental de la viticultura. El cultivo demanda gran cantidad de agua para completar su ciclo de crecimiento y además, se espera que la demanda por evaporación aumente como consecuencia del aumento de la temperatura global del aire. Todas esas circunstancias son frecuentes en la mayoría de las regiones semiáridas de producción de vid, así como en la mayor parte de la viticultura del "Nuevo Mundo" que requiere altos volúmenes de riego para obtener una cosecha razonable (Medrano *et al.*, 2015).

I. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático, es uno de los grandes retos actuales del sector vitivinícola del que ya estamos notando las consecuencias. Los modelos climáticos constatan que si las emisiones de gases de efecto invernadero continúan al ritmo actual, se seguirán dando un aumento de las temperaturas y un descenso de las precipitaciones, unido también a un aumento de fenómenos climáticos extremos como sequía u olas de calor (Cita IPCC 2014).

Estos condicionantes van a alterar la forma de viticultura actual, trastocando el equilibrio que existe entre clima, suelo y manejo del cultivo, dando lugar a cambios en la calidad y el rendimiento. Los problemas más significativos desde el punto de vista vitícola a los que nos enfrentamos por el cambio climático son:

- ✓ **Plagas y enfermedades:** La amenaza de nuevas plagas o enfermedades que hasta ahora no se habían dado por no tener unas condiciones favorables.

Plagas que ya existían, tienen ahora mayor número de generaciones con el consiguiente aumento de tratamientos fitosanitarios.

- ✓ **Nuevas zonas vitícolas:** Desplazamiento de las cosechas hacia zonas más frías donde antes no podía darse el cultivo de vid y ahora tienen condiciones para ello.
- ✓ **Adelanto en la recolección:** Al aumentar las temperaturas en las zonas tradicionales de cultivo de la vid, hace que se altere su fenología y ya se está comprobando que la madurez fenólica de la uva no es la misma que la madurez tecnológica. Esto va en detrimento de la calidad y el rendimiento.
- ✓ **Escasez de recursos hídricos:** Por la disminución de precipitaciones en las zonas tradicionalmente vitícolas y necesidad de más riego por las altas temperaturas.

Todo ello tiene consecuencias en la rentabilidad del sector, por suponer un incremento de los gastos de la explotación (fitosanitarios, combustible, agua) y

obtener menos ingresos al disminuir la calidad y el rendimiento de las cosechas.

La producción dependerá cada vez más del riego, ya que las condiciones de estrés hídrico se tienden a intensificar debido a un aumento en la intensidad de transpiración, patrones de lluvia cada vez más desiguales y una tendencia a la sequía en zonas del sur de Europa (Santesteban et al., 2019).

En la Tabla 1, Resco et al., (2014) muestran los efectos potenciales del cambio climático en la viticultura.

Tabla 1. Potenciales efectos del Cambio Climático (Resco et al., 2014)

Factor de cambio	Posibles beneficios	Posibles efectos negativos
Aumento de temperaturas	Periodos de crecimiento más rápidos. Menor riesgo de heladas	Aumento del estrés térmico. Disminución de la calidad (menor acidez, color y taninos). Aumento grado alcohólico. Exceso desarrollo vegetativo. Mayor riesgo de incendios. Aumento de plagas y enfermedades Aumento variabilidad rendimiento.
Disminución de la precipitación	Menor riesgo de enfermedades en zonas húmedas. Mejora de la calidad en zonas húmedas.	Aumento de la frecuencia de sequías. Mayor riesgo de incendios. Disminución de rendimientos.
Aumento de lluvias intensas o tormentas		Aumento de la erosión. Mayor riesgo de enfermedades. Daños en las plantas por inundaciones o pedriscos.
Aumento de gases de efecto invernadero	Incremento de producción biomasa.	Aumento de la variabilidad de la producción en respuesta a mayor variabilidad del clima.

II. EL RETO DE LA SOSTENIBILIDAD

Según la FAO (Food and Agriculture Organization), la sostenibilidad en la producción de alimentos tiene un papel central en las futuras estrategias de desarrollo nacional y planes de acción.

La relevancia de la sostenibilidad se debe a las evidencias del Cambio Climático y sus posibles consecuencias. Algunos autores (González-San José et al., 2017) definen el concepto de sostenibilidad como el modelo de desarrollo

en el que las acciones presentes no deben comprometer el futuro de las generaciones venideras, y que se vincula con un desarrollo económico y social respetuoso con el medio ambiente.

Según la Organización Internacional de Viticultura (OIV) la sostenibilidad en el sector vitivinícola 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 y poniendo en valor el patrimonio histórico, cultural, ecológico y paisajístico"(OIV 2011).

Para la viticultura, la sostenibilidad es una seria preocupación debido a los cambios de las condiciones climáticas y los cada vez más altos insumos necesarios para el cultivo. Además, los consumidores aprecian de manera más positiva los productos con una menor huella de carbono y huella hídrica del cultivo. Viticultores y enólogos buscan prácticas de cultivo y producción más saludable en relación con la sostenibilidad de viñedos y bodegas (Medrano *et al.*, 2015).

Los viticultores están actuando para modificar y mejorar sus procesos de producción y responder a este nuevo reto. En general, para realizar una viticultura sostenible, son cuatro los aspectos básicos del cultivo en los que se debe incidir:

- ✓ **Manejo del suelo:** En este punto hay que asegurarse de cuidar y proteger las tierras, cultivar el mejor material vegetal, hacer un control efectivo de crecimiento, usar los restos del procesado de la uva como principal ingrediente del abonado orgánico e introducir el manejo de las cubiertas vegetales en el cultivo.
- ✓ **Reducción de pesticidas:** Se puede llevar a cabo mediante el uso de enemigos naturales, que se alimentan de los insectos que dañan el viñedo. Se conoce como gestión integrada de plagas.

- ✓ **Gestión hídrica:** Utilizar sistemas de riego óptimos para el mejor aprovechamiento del agua, así como escoger los momentos en los que el riego es efectivo en cada etapa de crecimiento del viñedo.
- ✓ **Uso de energías limpias:** Apostar por energías alternativas procedentes de fuentes naturales e inagotables. Estas energías, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero al no generar dióxido de carbono (CO₂) y otros gases contaminantes. Además, son energías limpias y sus residuos no son de difícil tratamiento.

1.3 EL RIEGO COMO HERRAMIENTA PARA UNA VITICULTURA SOSTENIBLE

Debido a la vulnerabilidad de los sistemas productivos de la viticultura actual frente al Cambio Climático, la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos son claves para afrontar este reto desde la sostenibilidad.

La producción de uva de manera sostenible necesita una consideración con respecto al impacto ambiental que implica el aumento del volumen de riego de cara a los futuros cambios en el clima (Medrano *et al.*, 2015).

La creciente escasez de agua a nivel mundial y los elevados costes del riego están impulsando el desarrollo de métodos de riego que minimizan el uso del agua. La aparición de métodos de riego de precisión, como el riego por goteo, ha sido clave en la reducción del agua requerida en los cultivos. Pero por otro lado ha resaltado la necesidad de desarrollar nuevos métodos de programación y control de riego más precisos, basados en la detección de las necesidades hídricas del cultivo (Jones *et al.*, 2004).

El poder manejar el riego en base a indicadores objetivos de estrés hídrico, aportaría fiabilidad y seguridad a la gestión del riego, a la vez que estandarizaría la producción y la calidad de la uva.

También se pone de manifiesto la conveniencia de conocer la distribución espacial del déficit de agua en cada parcela, para que con un riego

adecuadamente sectorizado las condiciones hídricas del cultivo en esa parcela sean lo más uniformes posible.

1.4 EL AGUA COMO RECURSO NATURAL

Como hemos visto, uno de los desafíos clave a los que se enfrenta el mundo es cumplir con la creciente demanda de alimentos, agua y bienes materiales de una población mundial al alza, y el agua es el recurso natural más esencial (Herath *et al.*, 2013).

El agua es un factor crítico para una viticultura sostenible, ya que la producción de uva, la calidad y la viabilidad económica dependen en gran medida de la disponibilidad de agua. El consumo total de agua en un viñedo va de 300 a 700 mm, y es generalmente más alto que la precipitación media anual de muchas áreas vitícolas, lo que induce un riesgo para la sostenibilidad de los viñedos (Medrano *et al.*, 2015).

La agricultura desempeña un papel clave en relación con el estrés hídrico mundial. Cada vez más, se está usando la huella hídrica (WF) como indicador del impacto del uso del agua por los sistemas de producción (Herath *et al.*, 2013).

La huella hídrica (WF) es el método de medida propuesto a nivel global para cuantificar el uso de agua necesario para producir un bien o servicio y el impacto de su sistema de producción en los recursos hídricos. La huella hídrica se divide en tres componentes, huella hídrica azul, verde y gris. Se distinguen en función de la fuente de agua incorporada en el ciclo de vida del producto. El *agua azul* se refiere a aguas subterráneas y aguas superficiales; el *agua verde* es el agua de lluvia almacenada en el perfil del suelo como humedad del suelo; y el *agua gris* se refiere al agua contaminada y se define como el volumen de agua dulce requerida para asimilar la carga de contaminantes del proceso productivo basado en los estándares de calidad aceptables, tomando como referencia las normas de calidad medioambiental.

En general, el sector del vino requiere una gran cantidad de recursos hídricos en su proceso productivo, desde la producción de la uva en viñedo hasta que el vino está embotellado. Según autores como Miglietta *et al.*, (2018), un vaso de vino (0,125 litros) necesita 109 litros de agua de media en términos de huella hídrica.

De esta cantidad, la mayor parte del consumo tiene lugar durante el cultivo de la vid. Por eso, siendo el agua factor crítico para el desarrollo de una agricultura sostenible dada su escasez y el avance del Cambio Climático, se hace cada vez más necesaria la implementación de sistemas de riego de precisión como herramientas útiles para la gestión del agua (Gutiérrez *et al.*, 2018).

La viticultura es cada vez más global y competitiva, muchas de las regiones vitivinícolas tienen climas muy cálidos o semi-áridos. A su vez están surgiendo nuevas regiones vitivinícolas (como China) que aumenta la competencia global. Esto genera una mayor presión sobre las condiciones de cultivo del viñedo, debido a que el agua es un bien escaso, las temperaturas son más cálidas y hay una mayor competencia en el mercado del vino. Optimizar el uso del agua en el viñedo se está convirtiendo en una práctica estratégica para mantener la sostenibilidad de las explotaciones vitivinícolas (Scholasch 2018).

1.5 ESTADO HÍDRICO DEL VIÑEDO

El agua es de capital importancia para la vid puesto que es un componente esencial, por ser un medio de disolución y por su participación en las reacciones bioquímicas. También, por mantener el estado hídrico necesario para el crecimiento, porque permite el movimiento de las sustancias a través de la planta y por su papel fisiológico ligado a la transpiración que es primordial en el estado térmico de la planta mediante el intercambio de energía. Estas funciones están ligadas a la fotosíntesis de la que depende toda la productividad del viñedo y por lo tanto el desarrollo vegetativo, el rendimiento de la cosecha y la composición de la uva.

En viticultura, la importancia de conocer el estado hídrico del viñedo es fundamental porque afecta a parámetros como el rendimiento, crecimiento vegetativo/reproductivo y funcionamiento fisiológico y bioquímico. Además, la evolución del estado hídrico del viñedo influye en la calidad de la vendimia, determinada por la calidad sanitaria de la uva y la evolución bioquímica de la baya (azúcares, acidez, pH, compuestos fenólicos y precursores de aromas) y en el tipo de vino (Diago *et al.*, 2018).

No todas las variedades presentan las mismas necesidades hídricas ni la misma capacidad de adaptación y respuesta a diferentes niveles de sequía. Por lo tanto, es necesario estudiar las relaciones hídricas de las distintas variedades para establecer el riego según las particularidades de cada parcela (Santesteban *et al.*, 2009).

El Cambio Climático influye en la viticultura de tal manera que afecta a la capacidad de una zona para producir uva y vino de calidad. Su avance provoca inviernos más secos y precipitaciones menos frecuentes, pero más fuertes, provocando que las estaciones de crecimiento sean más secas con el consiguiente descenso de la productividad.

Un déficit excesivo de agua provocaría en el viñedo:

- ✓ Inhibición del crecimiento en general: Fotoinhibición, fotorrespiración, etc.
- ✓ Retraso de la maduración o maduración incompleta: Pérdidas de peso, pasificación, oxidaciones, reducción del color; inhibición de síntesis y/o degradación, disminución del contenido en ácidos (especialmente málico), pérdidas de aromas y desfase de la maduración de la pulpa con respecto a la de la piel y la de las semillas.
- ✓ Falta de funcionalidad de las hojas: Reducción de transpiración y fotosíntesis, envejecimiento y caída (Jones *et al.*, 2013).

1.6 PRINCIPALES MÉTODOS DE MEDIDA DEL ESTADO HÍDRICO

Para obtener información sobre las necesidades de riego, existen varios métodos que evalúan el estado hídrico del viñedo. Algunos de ellos se basan en la medida de la humedad del suelo, otros se basan en la medida de la evapotranspiración de la planta y el cálculo de la demanda atmosférica, y por último, los basados en la medición directa de la planta (Jones *et al.*, 2004).

Los métodos más comúnmente usados son los que evalúan el estado hídrico de la planta mediante medición directa sobre ella. Entre ellos se encuentran el cálculo del contenido relativo de agua (RWC), o la medición del potencial hídrico de la planta, ya sea de la hoja o del tallo (Ψ_{stem}) (Diago *et al.*, 2017). Existen también los métodos basados en respuestas fisiológicas de la planta ante la escasez de agua, como la medición de la conductancia estomática (g_s), del flujo de savia, la medida de la turgencia de la hoja y/o de las fluctuaciones del diámetro del tallo.

La mayoría de los métodos clásicos para medir el estado hídrico, como los basados en el uso de cámaras tipo Scholander, para determinar el potencial hídrico, son técnicas destructivas, que precisan gran cantidad de tiempo y trabajo para su determinación (Diago *et al.*, 2018), lo que impiden una adquisición de gran cantidad de datos, en ocasiones necesarias para evaluar la variabilidad del estado hídrico de un viñedo.

1.6.1 Métodos basados en la determinación de la humedad del suelo

El contenido de agua en el suelo se puede determinar por distintos métodos, que se pueden clasificar de forma genérica en directos e indirectos:

I. MEDICIÓN DIRECTA DE LA HUMEDAD DEL SUELO

- a) *Método gravimétrico*: Es el método oficial de referencia que se basa en una medición directa del contenido de agua en el suelo, determinando el peso de agua contenido en la masa de sólidos de una muestra de suelo. El contenido de agua en el suelo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\theta_g = \frac{\text{Peso de suelo húmedo} - \text{Peso de suelo seco}}{\text{Peso de suelo seco}}$$

θ_g : porcentaje gravimétrico de agua

Para expresar el contenido hídrico en porcentaje, el resultado se multiplica por 100 (Angella *et al.*, 2016).

El método consiste en tomar muestras de suelo a diferentes profundidades y localizaciones en campo, se pesan antes y después de su desecado y se calcula su contenido de humedad. La muestra de suelo se considera seca cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105°C. El método es simple pero lento y requiere muchas repeticiones para reducir los errores debido a la variabilidad del terreno (Calvache Ulloa 2002).

II. MEDICIÓN INDIRECTA DE LA HUMEDAD DEL SUELO

Los métodos indirectos miden alguna característica asociada al contenido de humedad en el suelo, como por ejemplo la dispersión de neutrones, la constante dieléctrica del agua, o el valor del potencial matricial (Angella *et al.*, 2016).

- a) *Dispersión de neutrones*: Su funcionamiento se basa en la emisión de neutrones a través de una sonda. Estos neutrones penetran en el suelo y chocan con los núcleos de los distintos elementos (Angella *et al.*, 2016). Al chocar con los núcleos de hidrógeno presentes en el suelo disminuye su velocidad. Al ser el agua la única fuente de hidrógeno del suelo y el núcleo de hidrógeno es el desacelerador más rápido de los neutrones, el número de neutrones lentos interceptados por el detector es directamente proporcional a la cantidad de agua del suelo (Calvache Ulloa 2002).

Como desventaja de este método (Figura 1) se puede señalar que es poco manejable debido a su peso, el alto coste del equipo, la dificultad de medir en la capa de suelo superficial y la necesidad de capacitación y habilitación especial de los operadores (Angella *et al.*, 2016).

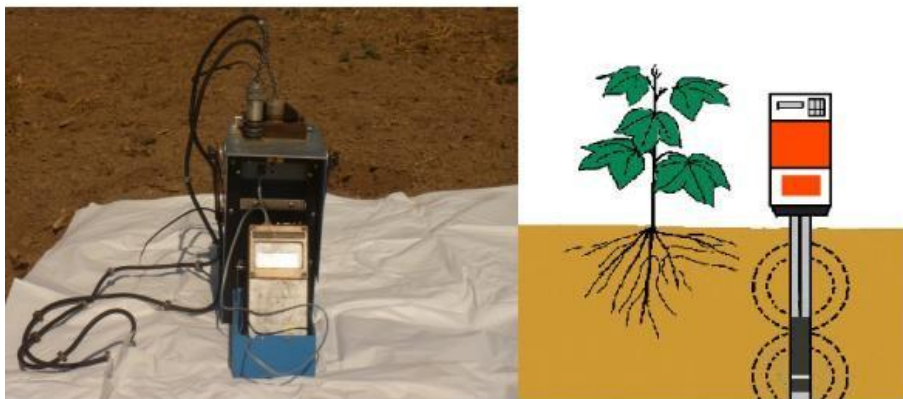


Figura 1. Equipo para medir la dispersión de neutrones mediante sonda. Fuente: INTA EEASE (2011)

b) Sensores de capacitancia: Las sondas de capacitancia miden la humedad del suelo respondiendo a cambios en su constante dieléctrica. La mayoría de los materiales del suelo tienen una constante dieléctrica (k) que varía entre 2 y 4, mientras que la constante dieléctrica del agua es de 80. Por lo tanto, a medida que el contenido hídrico del suelo aumenta, su constante dieléctrica también lo hace. Como se aprecia en la Figura 2, la sonda consiste en dos electrodos separados por un espaciador. El campo eléctrico de estos electrodos penetra en el suelo. La unidad de control monitoriza esta elevación de frecuencia y hace una correlación para determinar el contenido de humedad basado en la elevación de la frecuencia (Angella *et al.*, 2016).

Este tipo de sondas permiten la obtención de un registro de datos en continuo a lo largo de todo el perfil del suelo, ofreciendo medidas más o menos precisas pero que necesitan de una calibración previa en suelos arcillosos o con altos contenidos en materia orgánica (García *et al.*, 2005).

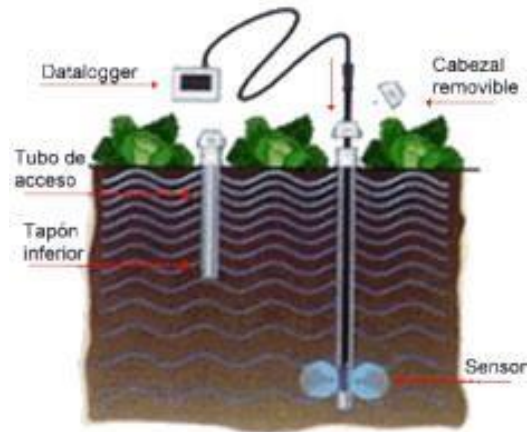


Figura 2. Equipo de medida de la capacitancia del suelo mediante dos electrodos separados. Fuente: www.viarural.com.ar

c) *Medida del potencial hídrico del suelo*: El principal componente de este método es el potencial matricial, aunque en suelos salinos el potencial osmótico tiene también su importancia (Calvache Ulloa 2002).

La fuerza con que el agua es retenida por el suelo depende del contenido hídrico del suelo, y mientras menor sea este, mayor será la cantidad de trabajo necesario para extraerla. A este trabajo se lo denomina potencial hídrico total y se mide en unidades de presión (bar, atmósfera, kilo Pascal, etc.). El *potencial matricial* es la parte del potencial total que se debe a las fuerzas de atracción del agua por la superficie de las partículas sólidas del suelo, y a las fuerzas de atracción molecular entre las propias moléculas del agua. El potencial matricial es el más importante de los componentes del potencial total desde el punto de vista agronómico (Angella *et al.*, 2016). El *potencial osmótico* resulta de las fuerzas de atracción que ejercen los solutos (sales) sobre las moléculas del solvente. (Lafi *et al.*, 2011).

i. *Método del tensiómetro*: El tensiómetro consiste en una cápsula porosa de cerámica, conectada a través de un tubo lleno de agua a un vacuómetro por medio de un tubo con cierre hermético (Figura 3). El agua se mueve hacia dentro y hacia fuera de la cápsula porosa para encontrar el equilibrio hidráulico. Cuando el

suelo se seca succiona agua de la cápsula y cuando está humedecido por riego o lluvia el agua fluye de nuevo al interior de ella. Dentro del sistema se crea una tensión que aumenta conforme el suelo se va secando (Calvache Ulloa 2002). El rango de medición está normalmente entre 0 y 0,8 bares que es el adecuado para controlar suelos regados. Con valores menores de potencial, suele producirse discontinuidad de la columna por formación de burbujas, y en tal caso no puede hacerse la lectura correctamente (Lafi *et al.*, 2011).

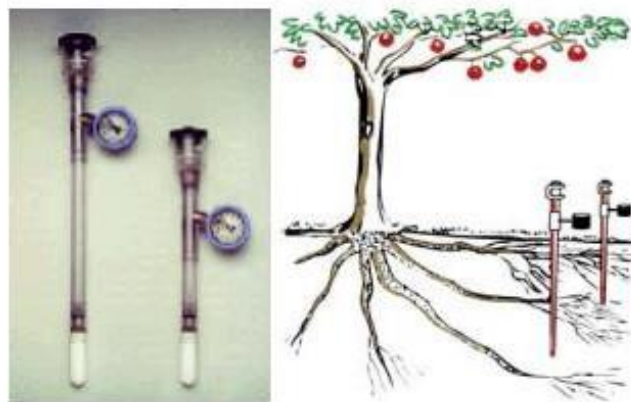


Figura 3. Imagen del tensiómetro para medir el potencial hídrico del suelo y esquema de colocación. Fuente: www.irrometer.com

- ii. *Método de resistencia eléctrica:* Los equipos que miden la resistencia eléctrica del suelo, consisten en unidades constituidas por dos electrodos contenidos en un material poroso (Figura 4). Una vez instalados en el suelo los electrodos se obtiene un equilibrio entre su contenido de agua y el contenido de agua en el suelo. Así, a medida que el bloque está más húmedo, la resistencia eléctrica medida entre los dos electrodos es menor. Esta resistencia a la transmisión eléctrica es el parámetro que se registra en el medidor y correlaciona la resistencia a unidades de presión (kilopascales) (Calvache Ulloa 2002).



Figura 4. Imagen de un equipo para medir el potencial hídrico del suelo mediante resistencia eléctrica del tipo Watermark, en el que los dos electrodos van encajados dentro de una matriz granular. Fuente: INTA EEASE (2011).

1.6.2 Métodos basados en la demanda atmosférica

Estos métodos se basan en la absorción del agua del cultivo por la atmósfera. Está condicionado por factores meteorológicos, atmosféricos y del cultivo y se mide a través de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) en mm/día:

- *Factores meteorológicos*: Las variables climáticas que intervienen en el proceso de evapotranspiración son la radiación solar (W/m²), la humedad relativa HR (%), la temperatura del aire T(°C) y el viento (m/s).
- *Factores atmosféricos*: Presión atmosférica. Con menor presión atmosférica mayor es la evapotranspiración.
- *Factores de cultivo*: Tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo afectan la evapotranspiración y deben tenerse en cuenta a la hora de determinar este parámetro en los cultivos (Pereira et al, 2015).

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) juega un papel importante en la estimación de la demanda atmosférica. Existen estudios que comparan diferentes métodos de cálculo de la (ET_o). Algunos métodos como el

de Samani o Penman no son lo suficientemente robustos para utilizarlos a escala global (Khandelwal et al, 2014). Por eso, la metodología más generalizada para su cálculo la describe la FAO en su "Estudio de riego y drenaje 56" (Pereira et al, 2015).

Para el coeficiente del cultivo (K_c) que expresa el estado de desarrollo de cada cultivo, se utilizan valores estandarizados para cuatro etapas típicas de desarrollo del cultivo y se proporciona este valor para un gran número de cultivos.

1.6.3 Métodos basados en la medida directa de la planta

Estos métodos tratan de conocer el estado hídrico del viñedo con medidas directas de la planta, considerando a ésta como biosensor, basándose en sus respuestas fisiológicas.

a) Medida del potencial hídrico (Ψ):

Esta medida se basa en considerar un sistema continuo suelo, planta, atmósfera. Se basa principalmente en la teoría de que el agua debe estar bajo tensión para ser transportada a través del xilema de la planta. Este modelo explica la aparición de déficits de agua a lo largo del camino desde la raíz hasta las hojas (Choné *et al.*, 2001).

El método más utilizado para conocer el potencial hídrico de la planta es la cámara de presión de Scholander (Figura 5). Proporciona una estimación relativamente rápida, flexible y precisa del estado hídrico de la planta. Sin embargo, existen algunas discrepancias sobre cómo y a qué hora del día se deben realizar las mediciones para obtener información significativa y precisa para el manejo del viñedo. En cuanto al procedimiento de medición, existen dos enfoques principales; ya sea midiendo el potencial hídrico de la hoja (Ψ_L) o del tallo (Ψ_S). El procedimiento más utilizado consiste en medir directamente en hoja. Sin embargo, un reciente meta-análisis de medidas de potencial hídrico de hoja (Ψ_L), potencial antes del amanecer (pre-dawn) (Ψ_{PD}) y potencial del tallo (Ψ_S) con más de 78.000 datos, ha revelado, que tanto el Ψ_{PD} , como el Ψ_S tienen más poder discriminante que el Ψ_L (Santesteban *et al.*, 2019).



Figura 5. Imagen de cámara de Scholander o de presión integrada en una caja transportable. Para su funcionamiento necesita una bomba externa de aire comprimido. Fuente: <https://www.mmm-tech.de/es>

El proceso de medición del potencial hídrico consiste en cortar una hoja adulta y no dañada, y colocarla en la tapa de la cámara de presión, de forma que únicamente el corte del peciolo sobresalga un poco. A continuación, se introduce la hoja dentro de la cámara de presión, se cierra herméticamente y se crea lentamente la presión en su interior introduciendo de forma controlada un gas inerte (ej. Nitrógeno). Tan pronto como empieza a aparecer una humectación de savia en la zona de corte del peciolo se alcanza el equilibrio buscado, es decir, la presión creada en la cámara equivale a la tensión bajo la cual se encuentra el agua de esa hoja en la planta. Cuanto mayor es la tensión, mayor es el estrés hídrico al que está sometida la hoja.

La medida del potencial hídrico del tallo se realiza recogiendo la hoja que se desee analizar y protegiéndola en una bolsa de plástico metalizada que se cerrará para disminuir su temperatura y transpiración. En el interior de la bolsa de aluminio no es posible ningún intercambio gaseoso, tras algunas horas se alcanza el equilibrio entre el potencial hídrico de esa hoja y el potencial hídrico del tallo de esa planta. La gran ventaja de este procedimiento es que no se debe realizar la medición al amanecer, sino que también puede realizarse durante el día.

b) Conductancia estomática (gs):

La conductancia estomática es otra de las variables importantes para evaluar el estado hídrico del viñedo de forma directa.

La conductancia estomática es un importante regulador del intercambio de vapor de agua y dióxido de carbono entre la hoja y el aire circundante, que afecta directamente el crecimiento de las plantas. Mayores tasas de conductancia o transpiración estomática están relacionadas con un mayor rendimiento de los cultivos (Iseki y Olaleye 2019).

La conductancia estomática también tiene un papel importante a la hora de minimizar la pérdida de agua de la planta cuando tiene que adaptarse a variaciones ambientales como las de la radiación solar, la humedad del aire, la temperatura del aire, la velocidad del viento y el contenido de agua del suelo (Flexas & Medrano 2002).

Las herramientas utilizadas para medir la conductancia estomática son el porómetro de hoja (Figura 6), y el medidor de intercambio de gases (Figura 7).



Figura 6. Porómetro tomando medida de la conductancia estomática, detalle de colocación de la pinza del porómetro a la hoja. Fuente www.lapacacr.com

El porómetro, mide la presión de vapor y el flujo de vapor sobre la superficie de la hoja. La pinza del porómetro se fija a la superficie de las hojas, y comienza a medir la presión de vapor entre dos puntos de la misma trayectoria,

para calcular el flujo y el gradiente con las medidas de presión de vapor y conductancia de difusión conocida.

Para utilizar el medidor de intercambio de gases se seleccionan las plantas que queremos medir y escogemos las hojas de la parte intermedia que estén bien desarrolladas y expuesta al sol. Se coloca la hoja dentro de la cámara, se cierra, se presiona hasta que el aparato nos muestre la lectura y luego se abre la cámara para proceder a la lectura de la siguiente hoja.



Figura 7. Medidor portátil de intercambio de gases LICOR Modelo LI-6400, además de utilizarlo para medir la conductancia estomática se usa también como medidor de fotosíntesis. Fuente: <https://www.licor.com>

El inconveniente de estas herramientas es que no son adecuadas para medir poblaciones grandes, ya que el tiempo por hoja que se emplea es de 20 a 60 segundos, además de ser instrumentos caros.

c) Dendrometría:

Diariamente se producen contracciones y dilataciones del tronco relacionadas con el estado hídrico de la planta, la dendrometría es una técnica que mide las fluctuaciones del diámetro del tronco de la planta. (Corell *et al.*, 2019).

Los índices más empleados y que resultan más útiles para conocer las necesidades de riego son, la contracción máxima diaria (MDS) y la tasa de crecimiento del tallo (SGR). Para vides jóvenes, y en períodos de rápido crecimiento del tallo, se utiliza más la tasa de crecimiento del tallo (SGR)

mientras que en vides con más edad la contracción máxima diaria (MDS) es el mejor indicador (Fernández y Cuevas 2010).

La contracción o dilatación de los tejidos del tronco de las plantas proporcionan una medición indirecta de la transpiración, y se relacionan con los cambios en el contenido de agua y turgencia de las plantas. Dependen de la disponibilidad de agua en el suelo y de las condiciones atmosféricas para que haya una mayor o menor evapotranspiración (Goldhamer y Fereres 2001).

Los dendrómetros (Figura 8) se instalan en el lado del tronco opuesto a la trayectoria del sol, para minimizar los efectos negativos del calentamiento por radiación solar directa. Deben estar a cierta distancia del suelo para evitar interferencia del crecimiento de malezas, y lo más lejos posible de cualquier cicatriz, como las causadas por injertos, podas y operaciones de labranza, etc. El dendrómetro debe estar siempre en contacto con la superficie del tronco protegido de impactos y agua de lluvia (Fernández y Cuevas 2010).



Figura 8. Dendrómetro instalado en tronco de vid . Fuente:www.vitivinicultura.es

Con esta técnica se consiguen registros automatizados en tiempo real del estado hídrico de la vid con el inconveniente de que se puede colocar en un número muy limitado de cepas.

Algunos autores (Ortuño *et al.*, 2010) han señalado otros factores que influyen en las variaciones del diámetro del tronco, como es la edad de la planta, el período fenológico o carga de cultivo.

d) *Flujo de savia:*

El flujo de savia es el movimiento de savia que se produce desde las raíces de la planta hasta las hojas por los tubos leñosos. La savia transportada por el xilema consiste principalmente en agua, elementos minerales, reguladores de crecimiento y otras sustancias que se hallan en disolución.

El flujo de savia se mide mediante sensores que registran la velocidad a la que la savia asciende por el tallo utilizando el calor como indicador. Una disminución en la disponibilidad de agua en el suelo induce una reducción de la conductancia estomática, disminuye la transpiración de la planta y, por tanto, la velocidad de la savia. (Acevedo-Opazo *et al.*, 2008).

Autores como Jones (2004) indican que, cambios en la tasa de transpiración que indica el flujo de savia y que están determinados en gran medida por los cambios en la apertura de estomas también se ven influenciados por otras condiciones ambientales como puede ser la humedad. Por lo tanto, cambios en el flujo de savia pueden ocurrir sin cambios en la apertura estomática.

El principio del funcionamiento de estos sensores de flujo de savia (Figura 9) es aplicar una fuente de calor constante en la corriente de savia bruta o en su proximidad. La temperatura en las proximidades de esta fuente se ve perturbada más o menos, según la cantidad del flujo de savia, y la pérdida de calor es directamente proporcional a este flujo.

La principal ventaja de los métodos de medición de flujo de savia es la capacidad de proporcionar mediciones continuas, a largo plazo, independientemente del tamaño de la parcela y las condiciones climáticas (Ferreira *et al.*, 2008) pero tienen el inconveniente de que solamente puede utilizarse en un número muy limitado de cepas.

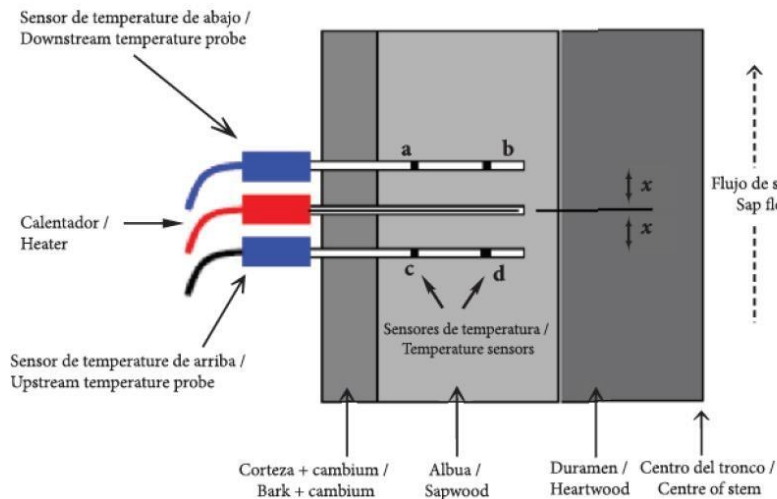


Figura 9. Esquema de la colocación del sensor de flujo de savia con el calentador en el centro y los dos sensores de temperatura arriba y abajo. Fuente: www.lapacacr.com

Los métodos explicados anteriormente son métodos lentos, demasiado laboriosos, muchos de ellos no automatizables y que normalmente precisan de personal cualificado, ya que son difíciles de operar e interpretar. También son destructivos en muchos casos y la mayoría de las veces sólo capaces de medir un número de muestras muy pequeño en un periodo de tiempo razonable (Diago *et al.*, 2017).

Estas son algunas de las razones por las que es necesario desarrollar nuevos métodos para monitorizar el estado hídrico del viñedo, capaces de realizar mediciones no destructivas, automatizadas y continuas (Diago *et al.*, 2018).

1.7 NUEVOS METODOS DE MEDIDA NO INVASIVOS

Algunos autores (Jones 2004; Fernández 2014) resumen algunas de las principales características del método ideal para la detección del estado hídrico basado en la medida directa de la planta. El método que plantean debe ser no destructivo, sensible a la variación del agua, capaz de proporcionar una respuesta rápida y fiable, así como económica, fácil de operar y apto para la automatización. Las nuevas técnicas, basadas en la medición sobre la planta,

para determinar el estado hídrico del viñedo, son métodos que integran, además, las medidas de suelo y los efectos atmosféricos (Jones 2004).

Técnicas como la **termografía y la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR)** han sido testadas en los últimos años como métodos alternativos, no invasivos, para evaluar el estado hídrico del viñedo.

1.7.1 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 por su capacidad de determinar más de un parámetro. Es fácil de usar y no requiere de gran preparación (Fernandez-Novales *et al.*, 2017).

La región NIR es la parte del espectro electromagnético entre 750 y 2500 nm. El fundamento de la tecnología NIRS se basa en la interacción que tiene lugar entre la radiación electromagnética infrarroja y la muestra, como consecuencia de la cual se producen cambios en el estado vibracional de las moléculas. El espectro vibracional de una molécula se considera una propiedad física única y por tanto, característica de esa molécula. Así, en función de los enlaces presentes en las moléculas (fundamentalmente del tipo –CH, -NH, -OH y –CO), la absorción de radiación será variable para cada frecuencia del espectro infrarrojo. Para poder extraer información a partir de los espectros NIR obtenidos se hace necesario el uso de métodos de análisis multivariante. Dado que el agua es el principal componente de una hoja su espectro de reflectancia en el rango espectral del NIR está dominado por el espectro del agua (Diago *et al.*, 2017).

Una de las ventajas de la espectroscopia NIR es la posibilidad de usarla en combinación con la quimiometría por su cantidad y calidad de análisis. Los espectros NIR están generalmente destinados a construir modelos de calibración y predicción de atributos o parámetros específicos (Diago *et al.*, 2017).

Trabajos recientes en espectroscopía han demostrado una alta aplicabilidad en el área de la viticultura, especialmente en relación con el estado hídrico del viñedo.

En un trabajo reciente (Tardáguila *et al.*, 2017), se evaluó la capacidad de la espectroscopía NIR portátil no invasiva para estimar el estado hídrico del viñedo, en diferentes variedades de vid y cultivadas bajo diferentes condiciones ambientales. El sensor comercial (que cubría el rango espectral de 1600-2400 nm) (Figura 10), se testó en ocho variedades de vid (cuatro blancas y cuatro tintas). Las medidas espectrales se realizaron por ambas caras de las hojas y en esas mismas hojas se tomó la medida del potencial hídrico del tallo (Ψ_s) y el contenido relativo de agua (RWC). Con estos datos se construyeron los modelos predictivos. Los óptimos resultados del estudio hacen que la espectroscopía NIR portátil no invasiva sea una herramienta adecuada para evaluar el estado hídrico del viñedo y da la posibilidad de establecer estrategias de optimización del riego.



Figura 10. Equipo de espectroscopía portátil de contacto microPHAZIR RXAnalyzer (1600-2400 nm) para realizar mediciones de manera no invasiva, rápida y fiable.
Fuente: www.thermofisher.com

Atendiendo a estudios recientes, la tecnología NIRS presenta también, gran potencial para evaluar el estado hídrico del viñedo en modo (*stop-and-go*). En este caso se utilizó un sensor NIR remoto (Figura 11) montado sobre una plataforma móvil terrestre que permite la toma de medidas espectrales a distancia (Diago *et al.*, 2017). El rango espectral utilizado para este estudio fue de 1100–2100 nm y se realizaron mediciones de las hojas de las vides con estrés hídrico y sin estrés de Riesling en dos momentos durante la temporada.

Los buenos resultados obtenidos y la gran cantidad de datos que se pueden obtener en muy poco tiempo, abren la posibilidad de instalación de estos sensores en vehículos no tripulados o en la propia maquinaria agrícola.



Figura 11. Equipo de espectroscopía a distancia Polytec NIR PSS para mediciones en continuo con capacidad para obtener gran número de medidas. Se puede instalar en cualquier vehículo capaz de avanzar por las filas del viñedo. Fuente: www.directindustry.es

Otro estudio más reciente (Diago *et al.*, 2018) desarrolló y validó esta herramienta de medición del estado hídrico en continuo (*on-the-go*) y sin contacto con la planta frente al método clásico de medida del potencial hídrico.

Otra aproximación en la aplicación de la tecnología NIRS fue desarrollada por (Fernández-Navales *et al.*, 2018). El objetivo de este estudio fue la cuantificación y distinción de diferentes regímenes de riego en el viñedo. Las medidas del estudio fueron tomadas en continuo) con el mismo sensor NIR (rango espectral 1200-2100 nm) posicionado en la parte delantera de la plataforma móvil terrestre. Las medidas espectrales se tomaron en el viñedo desde envero hasta maduración. Los resultados volvieron a confirmar el potencial de esta tecnología para cuantificar y discriminar el estado hídrico de la planta. El estudio fue desarrollado y validado con dos indicadores clásicos del estado hídrico del viñedo, el potencial hídrico del tallo y la conductancia estomática.

Existen otras aplicaciones de la tecnología NIRS, en el campo de la viticultura. Cada vez son más frecuentes los incendios en algunas zonas de nuestro planeta debido al Cambio Climático y cuando ocurren cerca de zonas

de viñedo, el humo afecta a las cepas, las bayas y al vino (Fuentes *et al.*, 2019). Este estudio demostró que con el empleo de la tecnología NIRS se pudieron cuantificar los niveles de contaminación por humo en bayas y vino. Uno de los más importantes efectos fisiológicos que produjo el humo en la cepa es la reducción de la conductancia estomática y en las bayas la adsorción del humo hace que ciertos compuestos indeseables se extrajeran en la vinificación. Las lecturas de espectroscopía NIR junto con la georreferenciación de los datos permitieron a los viticultores mapear las áreas del viñedo contaminadas para facilitar la toma de decisiones en la vendimia.

La industria vitivinícola es cada vez más competitiva. Ello hace que sea necesario disponer de herramientas eficaces para la producción de vinos de alta calidad. Según dos Santos *et al.*, (2019) la espectroscopía NIR permite desarrollar modelos predictivos de los atributos de calidad y maduración de las uvas de manera no destructiva. Se estudiaron las variedades "Syrah" y "Cabernet Sauvignon", obteniendo modelos robustos para la predicción del contenido total de sólidos solubles, antocianinas totales y flavonoides amarillos.

En relación con la producción de uva de calidad, la tecnología NIRS fue aplicada para monitorizar la composición de la uva dentro del viñedo y facilitar el proceso de clasificación y programación de la vendimia (Fernández-Navales *et al.*, 2019). Se llevaron a cabo un elevado número de medidas espectrales en continuo de los racimos de uva de las propias plantas. Dentro del contexto de la agricultura de precisión, el desarrollo de estos nuevos sensores, basados en la espectroscopía, permitió la adquisición de datos de alta resolución que se usaron para el seguimiento del desarrollo y maduración del cultivo. La capacidad de monitorizar la evolución y distribución espacio-temporal de manera rápida y no destructiva del total de sólidos solubles, antocianinas y polifenoles totales a lo largo del proceso de maduración de la uva en un viñedo, permitirá en gran medida la toma de decisiones sobre el momento de la vendimia en función de la calidad de la uva.

1.7.2 Termografía

La termografía en general, se basa en la detección de la radiación infrarroja emitida por los cuerpos, convirtiendo los valores obtenidos en imágenes visibles con información sobre la temperatura de la superficie de los mismos.

En el caso de las plantas, el cierre de los estomas, a través de los cuales tiene lugar el intercambio de gases con la atmósfera, es un proceso rápido que se da como respuesta al déficit hídrico. Cuando los estomas están abiertos, la transpiración enfría las hojas, pero cuando los estomas se cierran, ya no hay ningún mecanismo de enfriamiento. Como resultado, la temperatura de la hoja se convierte en indicador de transpiración o conductancia estomática, y por tanto del estrés hídrico. Esto ocurre cuando las condiciones ambientales son constantes (Grant 2012).

La temperatura de la superficie de las hojas se ve influenciada por las condiciones meteorológicas, como por ejemplo el viento, para minimizar sus efectos se utilizan índices térmicos como (CWSI) "Crop Water Stress Index" (Jones 1999), después de Idso (1982). También se utiliza el índice de conductancia estomática (I_G), que es linealmente proporcional a la conductancia estomática (g_s) en la mayor parte de su rango (Jones 1999).

Para su cálculo es necesario usar dos temperaturas de referencia, la temperatura de máxima evapotranspiración (T_{wet}) y la temperatura a la cual los estomas están cerrados totalmente (T_{dry}). Estos parámetros ayudan a disminuir la influencia que pueden tener las condiciones ambientales sobre la temperatura de la hoja.

$$CWSI = (T_{canopy} - T_{wet}) / (T_{dry} - T_{wet})$$

and

$$I_G = (T_{dry} - T_{canopy}) / (T_{canopy} - T_{wet})$$

Para obtener las temperaturas de referencia se toman dos hojas del viñedo. De una obtenemos la temperatura de máxima transpiración (T_{wet}) y de la otra obtenemos la temperatura mínima de transpiración (T_{dry}). Estas referencias deben medirse en el mismo entorno y al mismo tiempo y por lo tanto estando bajo las mismas condiciones meteorológicas. La temperatura (T_{canopy}) es la temperatura de la vegetación de las vides (Grant *et al.*, 2016).

Sin embargo, existen estudios en los que, en lugar de obtener estas temperaturas de referencia de esta manera, se eligen como referencia la temperatura máxima y mínima de la vegetación, lo que facilita y automatiza el proceso de medida (Gutiérrez *et al.*, 2018).

Con la termografía se puede medir rápidamente la temperatura de gran número de hojas, plantas, o incluso viñedos enteros. (Grant 2012).

Numerosos estudios (Pou *et al.*, 2014; Grant *et al.*, 2016; Gutierrez *et al.*, 2018) demuestran que la termografía es una herramienta robusta y fiable para evaluar el estado hídrico del viñedo, y muchos de ellos van encaminados a solventar varios desafíos para hacer esta técnica más precisa. También es de gran ayuda que las imágenes térmicas puedan ser tomadas mediante dispositivos portátiles (Pou *et al.*, 2014), con cámaras colocadas en plataformas terrestres (Gutierrez *et al.*, 2018) o mediante cámaras térmicas montadas en plataformas aéreas (Santesteban *et al.*, 2017), utilizando sensores más avanzados que proporcionan imágenes aéreas con gran resolución espectral y espacial. Uno de los desafíos que se busca solventar es, que la vid no es un cultivo continuo, lo que significa que en las imágenes aéreas además de las hojas de la vid aparecen en la imagen el suelo del viñedo o la cubierta vegetal si existe. Por eso, con este tipo de imagen, las temperaturas de las hojas deben separarse de las temperaturas del suelo o de las cubiertas vegetales entre las hileras de vid. En segundo lugar, decir que las mediciones que se realizan de manera manual o desde plataformas terrestres, ofrecen una medida lateral de la vegetación del viñedo (entre las líneas de cultivo). Por el contrario, si se realizan desde plataformas aéreas la medición se lleva a cabo desde una posición cenital, en la parte superior de la vegetación de la vid (Grant 2012). Por esta razón, algunas de las recientes investigaciones se han centrado en

evaluar si las imágenes térmicas tomadas desde una posición cenital (aéreas) pueden proporcionar información igualmente válida que las tomadas en las hojas verticales del viñedo.

Según el trabajo de (Grant *et al.*, 2016), con imagen térmica se detectó la variación en la conductancia estomática y, por lo tanto, la variación espacial en el estado hídrico de la vid. Se evaluó también su variación temporal mediante los índices que relacionan la temperatura de la vegetación con las temperaturas de referencia. Pero el objetivo de su estudio era estandarizar el proceso, obtener unas superficies de referencia que facilitasen la obtención de los índices térmicos. A su vez, se quiso comprobar si las hojas situadas en la parte superior de la vegetación y las hojas verticales de los lados de la vegetación (entre hileras de vid) podían proporcionar la misma información válida para determinar el estado hídrico del viñedo.

Se desarrollaron unas hojas artificiales (seca y húmeda) para estandarizar la determinación de las temperaturas de referencia. Además, las imágenes de la parte superior de las filas ofrecieron correlaciones bastante significativas entre los índices térmicos y las variables fisiológicas. Los resultados confirmaron que la inclusión de estas superficies de referencia estandarizarían la técnica de la termografía y también que las temperaturas de las hojas de la parte superior de la vegetación del viñedo fueron igual de buenos indicadores de variación en conductancia estomática (gs) que las temperaturas de las hojas de los lados de las filas. El estudio supuso un gran avance ya que con imágenes aéreas se podría obtener información de áreas mucho más grandes de viñedo en menor tiempo.

Para el uso de la termografía, era importante conocer si en la determinación del estado hídrico de la planta había diferencias entre hacerlo con imágenes de la parte soleada o de la parte sombreada de la vid. Por esta razón hubo que llegar a un consenso.

Se iniciaron investigaciones como la llevada a cabo por Pou *et al.*, (2014) cuyo objetivo fue identificar cual era el mejor momento del día para aplicar la técnica de la termografía para evaluar el estado hídrico de la vid. Se evaluaron diferentes momentos del día (mañana, mediodía y tarde), ambos lados de la

vegetación (iluminado por el sol y sombreado) y diferentes estados hídricos. La variación de temperatura de la vid se determinó mediante el uso de imágenes térmicas de manera próxima y sin contacto. También en este estudio, se evaluó la influencia del estado hídrico de la vid en la temperatura de la baya. Algunos autores, han correlacionado las temperaturas de la uva con la composición de antocianinas y su concentración en las bayas. De los resultados obtenidos, la mejor correlación entre los índices térmicos calculados (CWSI y Ig) y la conductancia estomática medida, se obtuvieron al mediodía y en el lado sombreado de la vegetación de la vid. Con respecto al estudio de la temperatura de las bayas, se concluyó que para las vides con estrés hídrico, la temperatura de la baya aumentó entre 1 y 2°C con respecto a las bayas de vides sin estrés hídrico, con el consiguiente efecto en su composición.

El estudio de Gutierrez *et al.*, (2018), da un paso más allá. En este trabajo se realizó la estimación del estado hídrico del viñedo utilizando imágenes térmicas capturadas en continuo (on-the-go). La cámara térmica se colocó en una plataforma móvil terrestre desde la que, en continuo (a una velocidad ~5 Km/h), se tomaron las imágenes de la vegetación del viñedo por los dos lados de la espaldera. Como medida de referencia se midió el potencial hídrico y las temperaturas de referencia T_{wet} y T_{dry} se determinaron para el cálculo de los dos índices térmicos "Crop Water Stress Index" (CWSI) y el índice de conductancia estomática (Ig). La investigación no solo sirvió para desarrollar un nuevo método de termografía en continuo, sino que se obtuvieron modelos de predicción muy robustos elaborados con una gran cantidad de datos (una campaña completa), con los que se pueden hacer estimaciones sobre las necesidades hídricas en viñedos enteros. Además, se lograron buenos resultados de predicción sin la necesidad de usar temperaturas de referencia, eliminando así este requisito que automatiza aún más el método.

En los últimos años, la resolución de las imágenes térmicas ha aumentado y el peso y tamaño de los dispositivos ha disminuido, fomentando su implementación en vehículos aéreos no tripulados (UAV). El estudio llevado a cabo por Santesteban *et al.* (2017) sirvió para valorar en qué medida la imagen térmica de alta resolución permite conocer variabilidad instantánea y estacional del estado hídrico dentro de un viñedo. La novedad y la importancia del estudio

fue que el vehículo aéreo no tripulado (UAV) específicamente diseñado y construido proporcionó imágenes de muy alta resolución (píxeles <9 cm), y que se utilizó en una superficie relevante de viñedo (7,5 ha). El resultado del estudio mostró que las imágenes térmicas tomadas desde una plataforma UAV (vehículo aéreo no tripulado, o dron) tenían potencial para mapear variaciones instantáneas del estado hídrico de un viñedo. Las imágenes también aportaron información relevante sobre la variación hídrica estacional, pero para tener un resultado más exacto se necesitaría adquirir más imágenes en varias fechas sobre todo en el periodo de maduración del viñedo.

Como se va demostrando, la termografía aérea y terrestre se ha convertido en una herramienta práctica para determinar las condiciones de estrés hídrico en viñedos. Sin embargo, algunos autores (Sepúlveda *et al.*, 2016) consideran que para el uso adecuado de esta técnica es necesario seleccionar las zonas de la vegetación para tomar las imágenes. Su estudio evaluó el estrés hídrico de la vid utilizando diferentes valores de (T_{wet} y T_{dry}) medidos en diferentes zonas y condiciones de la vegetación (zonas desde el suelo: iluminada por el sol, sombra, y nadir; y la vista aérea (UAV)) y comparó las diferencias entre ellos en términos de su relación con variables de referencia, conductancia estomática (g_s) y potencial hídrico (Ψ_s). Las mejores correlaciones se registraron durante el periodo de máxima demanda atmosférica (cerca del envero) con buenas correlaciones para todos los métodos.

La técnica de la termografía puede también tener otros usos en el campo de la viticultura.

Así, se ha utilizado como herramienta de fenotipado (Grant 2012), utilizando imágenes térmicas para comprender mejor diferentes respuestas fisiológicas en diferentes variedades. Algunas de las técnicas de mejora genética requieren a menudo gran cantidad de información fenotípica de diferentes genotipos y gracias a la imagen térmicas se pueden evaluar gran cantidad de plantas que no sería posible con otras técnicas más tradicionales.

Otra aplicación, según Stoll *et al.*, (2008), es la detección de enfermedades de la vid. El estudio encontró que podría utilizarse para detectar la infección en las hojas de la vid con el hongo "*Plasmopara viticola*" al menos tres días antes

de que los síntomas fueran visibles para el ojo humano. En el estudio la respuesta de temperatura al ataque del hongo fue diferente en cepas bien irrigadas que en las expuestas a la sequía. Pero evaluando la variación de temperatura dentro de una hoja, y no de manera global, era posible detectar la presencia del hongo, independientemente del régimen de agua. Este estudio solo fue realizado en invernadero, de momento no ha sido testado en campo.

La termografía también se ha utilizado para monitorizar la temperatura de desarrollo de las uvas como factor determinante para la calidad del vino final (Stoll *et al.*, 2008).

Monitorizar la temperatura de las hojas o vegetación del viñedo sería un registro útil del tiempo en el que la planta está a temperatura óptima para realizar la fotosíntesis, con lo que pueden ser incorporados estos datos para predicciones en modelos de productividad (Grant 2012).

A la vista de los diferentes estudios sobre la técnica de la termografía, esta ha supuesto un gran avance respecto a las técnicas tradicionales de evaluación del estado del viñedo. La termografía aporta gran cantidad de medidas en muy poco tiempo de manera no invasiva, los métodos de medida cada vez están más automatizados y la posibilidad de usarla colocada en diferentes plataformas móviles hacen que se puedan evaluar mayores superficies de viñedo de manera más fiable por la cantidad de datos que se recogen.

1.8 EL VIGOR DE LA CEPA

1.8.1 Definición y principales implicaciones vitícolas

El concepto de vigor de un viñedo hace referencia al crecimiento y desarrollo alcanzado por los sarmientos. La medida del vigor de un viñedo permite conocer su crecimiento y desarrollo vegetativo (Smart & Robinson 1991).

El vigor, en general, va a depender de:

- La variedad de vid y el tipo de patrón en el que está injertado.

- Las condiciones del suelo. La disponibilidad de agua y nutrientes (sobre todo nitrógeno), materia orgánica y competencia radicular con otras especies.
- Los factores climáticos.
- Técnicas de cultivo: Densidad de plantación, sistema de conducción y poda, aplicación de fertilizantes y riegos.

El vigor del viñedo viene determinado en gran medida por la disponibilidad del agua, aumentando éste conforme aumenta el agua de riego. Si se aporta un riego sin restricciones, el desarrollo vegetativo es excesivo y puede haber competencia con las bayas de uva por los foto-asimilados. Con demasiado desarrollo vegetativo, pueden aparecer problemas de maduración (más lenta debido a la competencia entre frutos y brotes) y se favorece el desarrollo de enfermedades debido al aumento de humedad y a la sombra producida (Pellegrino *et al.*, 2006).

La producción del viñedo, con frecuencia, es directamente proporcional al crecimiento vegetativo. Una mala gestión de esta vegetación puede afectar a la cantidad o calidad de la uva producida, por ello es importante que el vigor se mantenga dentro de unos límites mínimos y máximos. Mínimo, que garantice una superficie foliar adecuada para asegurar una óptima maduración de la uva y acumulación de reservas, y máximo, para que no impida una buena exposición solar de hojas y racimos (Smart & Robinson 1991).

1.8.2 Métodos de medida del vigor

La determinación del vigor del viñedo es importante, ya que, el problema más frecuente en el viñedo con relación al vigor es el exceso más que el defecto; un bajo vigor se detecta y se corrige más fácilmente, mientras que un exceso de vigor pasa más desapercibido y es más difícil corregir (Martínez de Toda 2007).

1.8.1.1 Métodos clásicos de la medida del vigor del viñedo

I. PESO DE LA MADERA DE PODA O PESO DEL SARMIENTO

El peso de la madera de poda es el indicador más importante utilizado para evaluar el vigor del viñedo. Este indicador es particularmente sensible a factores como la fertilidad, profundidad del suelo y la disponibilidad de agua. La evaluación manual del peso de la poda es un proceso laborioso y lento, que interfiere con el proceso de poda habitual, debido a la necesidad de recoger y pesar los sarmientos correspondientes podados (Millán *et al.*, 2019).

Algunos trabajos establecen unos límites para el peso del sarmiento entre 30 y 65 g y para el peso de la madera de poda de 0,3 y 0,8 Kg/cepa (Martínez de Toda 2007),

II. LONGITUD DEL SARMIENTO

Otro de los métodos frecuentemente utilizados para la estimación del vigor es la media de la longitud del sarmiento. Es conveniente hacer esta medida en la época de maduración (alcanzado el envero), porque el sarmiento ya ha dejado de crecer (parada vegetativa). Si el sarmiento ha sido despuntado, la longitud total a considerar será la suma del sarmiento principal más la longitud de los diferentes nietos desarrollados como consecuencia del despunte (Martínez de Toda 2007). Este mismo autor estima que la longitud para que el vigor sea adecuado debe estar entre 90 y 140 cm por pámpano.

III. MEDIDA DEL DIÁMETRO MÁXIMO DEL ENTRENUDO

Este método se puede utilizar si se quiere estimar el vigor del viñedo una vez que está podado. La medida siempre se realiza de manera manual y en un número limitado de cepas. Se toma la medida del diámetro máximo del segundo entrenudo del pulgar dejado en la poda y sus límites estarían entre 8,5 mm y 10,5 mm de diámetro (Martínez de Toda 2007).

Existen otra serie de parámetros clásicos medidos en el terreno que permiten evaluar el vigor de un viñedo. Como los descritos anteriormente, miden básicamente el número, longitud, diámetro, peso o superficie del

sarmiento como órgano de crecimiento y desarrollo de la vid (Smart & Robinson 1991):

- Superficie foliar del sarmiento principal
- Superficie foliar de los brotes laterales
- Longitud del brote lateral
- Número de sarmientos por cepa
- Número de brotes laterales del sarmiento
- Número de nudos del sarmiento principal, no despuntado
- Peso o masa de los brotes laterales
- Peso o masa de las hojas de la cepa (sarmiento principal y brotes laterales)
- Porcentaje de porosidad de las hojas

1.8.2.2 Métodos no invasivos de medida del vigor del viñedo

Al igual que lo comentado anteriormente para el estado hídrico, para la medida del vigor existen también métodos de medición no invasivos, más rápidos, que recogen un mayor número de datos y son menos laboriosos.

I. MEDIDA DE LA FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA

La clorofila (Chl), los flavonoles (Flav) y el nitrógeno (N) son componentes clave en la fisiología de la vid (Diago *et al.*, 2016). La clorofila es el pigmento responsable de la fotosíntesis, los flavonoles tienen múltiples funciones fisiológicas dentro de la vid y el nitrógeno es considerado como el elemento nutricional más importante en la producción de vegetación. Estos tres parámetros guardan una relación con el vigor de la cepa.

Existen sensores ópticos que miden la emisión de fluorescencia de la clorofila en bandas de diferentes longitudes de onda UV_A (375 nm), azul (450 nm), verde (530 nm) y rojo (630 nm) (Tremblay *et al.*, 2012). En la figura 12 se muestra el espectro de absorción de la clorofila.

Esta tecnología (fluorescencia de la clorofila) se basa en excitar en una banda concreta y medir la fluorescencia emitida tras la absorción de luz por parte de la

planta en una banda longitud de onda más alta, de menor energía.

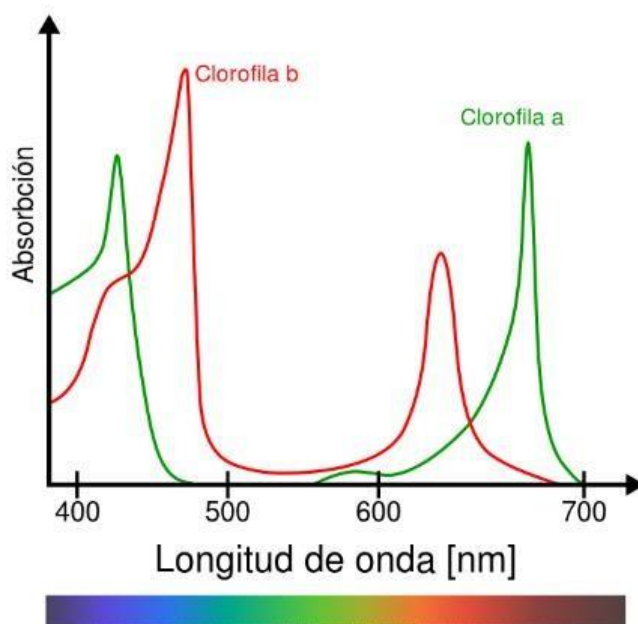


Figura 12. Espectro de absorción de la clorofila en las diferentes longitudes de onda.
Fuente: www.droncontrol.com

La evaluación del estado del nitrógeno en la planta depende de la cantidad de flavonoles y de la concentración de clorofila en la planta. Esta relación se conoce como el Índice de Balance de Nitrógeno (NBI):

$$\text{NBI} = \text{Chl} / \text{Flav}$$

El NBI, se calcula como el cociente entre la cantidad de clorofila (Chl) y flavonoles (Flav). La concentración de clorofila aumenta, mientras que la de los flavonoles disminuye con una mayor aplicación de nitrógeno, de modo que el NBI aumenta con la fertilización con nitrógeno (Tremblay *et al.*, 2012).

El nitrógeno es considerado uno de los factores más importantes en la producción de biomasa, vigor y metabolismo de la vid. Es crucial para el rendimiento del viñedo y por lo tanto, es indicador de vigor (Diago *et al.*, 2016).

Las medidas de estos compuestos, generalmente se realizan con métodos destructivos. Actualmente, estas medidas pueden ser tomadas con sensores

ópticos (Figura 13) de manera mucho más rápida y eficaz. Estos métodos ópticos se basan en la transmitancia de las hojas, reflectancia o fluorescencia.



Figura 13. Medidor óptico Dualex. Medidor de pinza portátil que permite medir los índices de clorofila y otros parámetros de las hojas. Se pueden registrar más de 10.000 mediciones, permite exportar datos y georreferenciar las muestras. Fuente: www.gabsystem.com

Según Diago et al. (2016), con los sensores de fluorescencia usados manualmente o en continuo (on-the-go), se pudo caracterizar el estado nutricional y el vigor del viñedo. La caracterización de la variabilidad espacio-temporal de estos parámetros es una información fundamental para optimizar la gestión del viñedo, y la determinación de zonas con distinto vigor.

II. *ÍNDICES ESPECTRALES DE VEGETACIÓN*

Otra manera de estimar el vigor del viñedo de manera no destructiva, es utilizar la medida de los índices espectrales. Estos índices se basan en la medición de la reflectancia de la hoja de la vid a distintas longitudes de onda (Rodríguez-Pérez *et al.*, 2007).

Los índices espectrales son combinaciones aritméticas de las bandas espectrales originales capturadas por un sensor (Rey-Caramés *et al.*, 2015). Normalmente se expresan en forma de ratios o cocientes normalizados de reflectancia a distintas longitudes de onda del rango espectral. Las bandas de reflectancia utilizadas pertenecen a las zonas del espectro donde existe una respuesta fisiológica por parte de la planta.

Las variaciones ambientales también pueden producir cambios en la fenología o la biología de la vid que pueden detectarse mediante mediciones de reflectancia (González-Fernández *et al.*, 2015).

Las bandas se pueden combinar de múltiples maneras (Tabla 2) para generar índices de vegetación (VI) relacionados con el estado nutricional del viñedo, con el estado hídrico, etc. (Rodríguez-Pérez *et al.*, 2007). Según este mismo autor, dentro del rango espectral la vegetación se caracteriza por tener una baja reflectancia en la región visible (VIS: 400–700 nm), una alta reflectancia en la región del infrarrojo cercano de onda corta (SWNIR: 700–1300 nm) y una reflectancia intermedia en la región del infrarrojo medio de onda corta (SWIR; 1400–3000 nm).

En los índices espectrales se basan la mayoría de los estudios de teledetección en agricultura (Rey-Caramés *et al.*, 2015). La teledetección implica la adquisición de datos espectrales a través de sensores colocados en distintas plataformas, con la premisa de que siempre se realiza a distancia, sin contacto con el objeto a medir. Pueden ser plataformas terrestres como tractores, maquinaria agrícola, vehículos todoterreno o incluso robots autónomos, mientras que en el caso de plataformas aéreas pueden ser satélites, aeronaves y sistemas aéreos controlados remotamente (RPAS).

En la teledetección, el vigor es visto como una combinación de biomasa vegetal (tamaño de la vid) y actividad fotosintética (Kazmierski *et al.*, 2011).

a) *NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)*

El índice de vegetación más utilizado como indicador del vigor de la vid es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), relacionado con la diferencia entre la luz reflejada en el infrarrojo cercano y en la región del visible (color rojo) (Figura 14). Un viñedo saludable se caracteriza por valores altos de NDVI, mientras que valores bajos de NDVI corresponden a vegetación estresada (Tanda y Chiarabiani 2019).

Tabla 2. Índices de vegetación (VI), adaptado de (Rodríguez-Pérez *et al.*, 2007)

Index (abbreviation)	Equation	Reference
Greenness (GI)	$GI = \frac{R_{554}}{R_{677}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a, 2005b
Zarco-Tejada and Miller (ZTM)	$ZM = \frac{R_{250}}{R_{710}}$	Zarco-Tejada et al. 2001, 2005a
Red/Green (RGI)	$RGI = \frac{R_{695}}{R_{554}}$	after Fuentes et al. 2001, Gamon and Surfus 1999
Red/Green (RGI1)	$RGI1 = \frac{R_{690}}{R_{550}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Green (BGI)	$BGI = \frac{R_{400}}{R_{550}}$	after Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Green (BGI1)	$BGI1 = \frac{R_{420}}{R_{554}}$	after Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Green (BGI2)	$BGI2 = \frac{R_{400}}{R_{550}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Red (BRI)	$BRI = \frac{R_{400}}{R_{690}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Red (BRI1)	$BRI1 = \frac{R_{450}}{R_{690}}$	Zarco-Tejada et al. 2005a,b
Blue/Red (BRI2)	$BRI2 = \frac{R_{440}}{R_{690}}$	This study
Ratio Vegetation (RVI)	$RVI = \frac{R_{800}}{R_{673}}$	after Broge and Mortensen 2002
Green/Red Ratio (GRR)	$GRR = \frac{R_{554}}{R_{673}}$	Fuentes et al. 2001
Normalized Green/Red Ratio (NGRR)	$NGRR = \frac{R_{673} - R_{554}}{R_{673} + R_{554}}$	This study
Normalized Green/Red Ratio (NGRR1)	$NGRR_1 = \frac{R_{673} - R_{554}}{R_{673} + R_{554}}$	This study
Simple Ratio (SR1)	$SR = \frac{R_{345}}{R_{665}}$	after Broge and Mortensen 2002
Simple Ratio (SR1)	$SR1 = \frac{R_{695}}{R_{760}}$	This study
Simple Ratio (SR2)	$SR2 = \frac{R_{1070}}{R_{1340}}$	This study
Simple Ratio (SR3)	$SR3 = \frac{R_{678}}{R_{880}}$	This study
Simple Ratio (SR4)	$SR4 = \frac{R_{678}}{R_{1070}}$	This study
Red/Blue (RBI)	$RBI = \frac{R_{695}}{R_{445}}$	This study
Difference Vegetation (DVI)	$DVI = R_{880} - R_{673}$	after Broge and Mortensen 2002
Moisture Stress (MSI)	$MSI = \frac{R_{1650}}{R_{835}}$	after Hunt and Rock 1989
Moisture Stress (MSI1)	$MSI1 = \frac{R_{270}}{R_{250}}$	This study
Normalized Difference VI (NDVI)	$NDVI = \frac{R_{215} - R_{665}}{R_{215} + R_{665}}$	after Rouse et al. 1974
Normalized Difference VI (NDVI1)	$NDVI1 = \frac{R_{270} - R_{673}}{R_{270} + R_{673}}$	Zhao et al. 2005
Normalized Difference VI (NDVI2)	$NDVI2 = \frac{R_{858.5} - R_{645}}{R_{858.5} + R_{645}}$	This study
Normalized Difference VI (NDVI3)	$NDVI3 = \frac{R_{870} - R_{673}}{R_{870} + R_{673}}$	This study

Tabla 2: Índices de vegetación (VI), adaptado de (Rodríguez-Pérez *et al.*, 2007) (cont.)

Index (abbreviation)	Equation	Reference
Normalized Difference Vegetation (NDVI4)	$NDVI4 = \frac{R_{884} - R_{680}}{R_{884} + R_{680}}$	This study
Modified NDVI (mNDVI)	$mNDVI = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705}}$	Fuentes et al. 2001, Gitelson et al. 1996
Photochemical Reflectance (PRI)	$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}$	Fuentes et al. 2001, Gamon and Surfus 1999
Photochemical Reflectance (PRI1)	$PRI1 = \frac{R_{528} - R_{567}}{R_{528} + R_{567}}$	after Gamon et al. 1992
Photochemical Reflectance (PRI2)	$PRI2 = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}$	after Gamon et al. 1992, Peñuelas et al. 1997b
Photochemical Reflectance (PRI3)	$PRI3 = \frac{R_{570} - R_{539}}{R_{570} + R_{539}}$	after Gamon et al. 1992
Normalized Pigments Chlorophyll Ratio (NPCI)	$NPCI = \frac{R_{680} - R_{430}}{R_{680} + R_{430}}$	Peñuelas et al. 1994
Simple Ratio Pigment (SRPI)	$SRPI = \frac{R_{430}}{R_{680}}$	Peñuelas et al. 1995a
Normalized Phaeophytinization (NPQI)	$NPQI = \frac{R_{415} - R_{435}}{R_{415} + R_{435}}$	Barnes 1992; Peñuelas et al. 1995a
Structure Intensive Pigment (SIPI)	$SIPI = \frac{R_{800} - R_{445}}{R_{800} + R_{680}}$	after Peñuelas et al. 1995b, Zarco-Tejada et al. 2005a
Structure Intensive Pigment (SIPI1)	$SIPI1 = \frac{R_{800} - R_{450}}{R_{800} + R_{650}}$	after Peñuelas et al. 1995b, Zarco-Tejada et al. 2005a
Normalized Difference Nitrogen (NDNI)	$NDNI = \frac{\log(1/R_{1510}) - \log(1/R_{1680})}{\log(1/R_{1510}) + \log(1/R_{1680})}$	Serrano et al. 2002
Normalized Difference Lignin (NDLI)	$NDLI = \frac{\log(1/R_{1754}) - \log(1/R_{1680})}{\log(1/R_{1754}) + \log(1/R_{1680})}$	Serrano et al. 2002
Cellulose Absorption (CAI)	$CAI = 0.5 * (R_{2000} + R_{2200}) - R_{2100}$	Nagler et al. 2000
Normalized Difference Water (NDWI)	$NDWI = \frac{R_{860} - R_{1240}}{R_{860} + R_{1240}}$	Gao 1996, Zarco-Tejada et al. 2003
Normalized Difference Water (NDWI1)	$NDWI1 = \frac{R_{858.5} - R_{1240}}{R_{858.5} + R_{1240}}$	Gao 1996
Normalized Difference Water (NDWI2)	$NDWI2 = \frac{R_{870} - R_{1260}}{R_{870} + R_{1260}}$	This study
Water Band (WBI)	$WBI = \frac{R_{970}}{R_{900}}$	Peñuelas et al. 1993
Water (WI)	$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}}$	Peñuelas et al. 1997a
Floating Position Water Band (fWBI)	$fWBI = \frac{\min(R_{930-980})}{R_{900}}$	Strachan et al. 2002
Simple Ratio Water (SRWI)	$SRWI = \frac{R_{858}}{R_{1240}}$	Zarco-Tejada et al. 2003
Simple Ratio Water (SRWI1)	$SRWI1 = \frac{R_{880}}{R_{1265}}$	This study
Simple Ratio Water (SRWI2)	$SRWI2 = \frac{R_{1350}}{R_{870}}$	This study
Simple Ratio Water (SRWI3)	$SRWI3 = \frac{R_{880}}{R_{1265}}$	This study
Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance (TCARI)	$TCARI = 3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{650})] * (R_{700} / R_{670})$	Haboudane et al. 2002
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance (MCARI)	$MCARI = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550})] * (R_{700} / R_{670})$	Daughtry et al. 2000
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance (MCARI1)	$MCARI_1 = 1.2 * [2.5 * (R_{800} - R_{670}) - 1.3 * (R_{800} - R_{550})]$	Haboudane et al. 2004

Tanda y Chiarabiani (2019), señalan que el NDVI, utiliza solo dos valores de reflectancia, tomados al mismo tiempo y para la misma área objetivo, según la relación:

$$\text{NDVI} = \frac{(R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}})}{(R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}})}$$

donde R es la reflectancia espectral del objetivo y los subíndices NIR y RED indican el infrarrojo cercano (790-890 nm) y las del rojo del visible (610-680 nm), respectivamente.

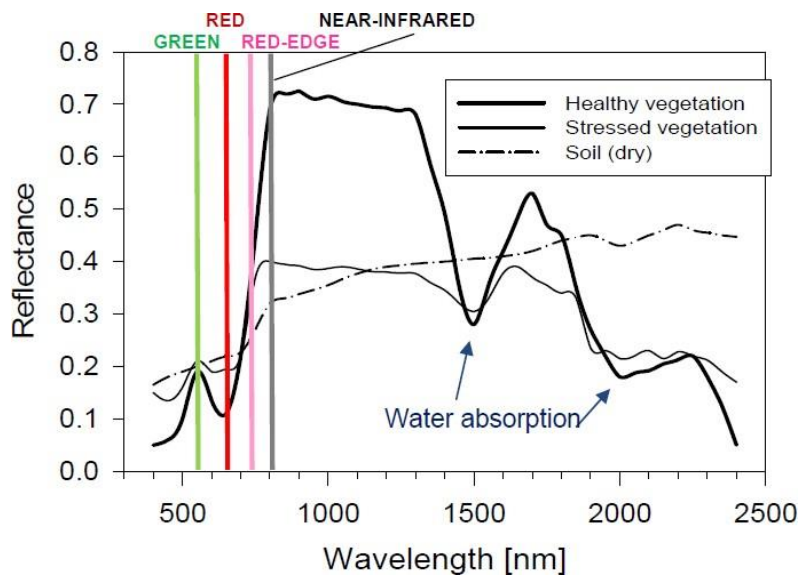


Figura 14. Respuestas espectrales típicas de la vegetación y del suelo. En el espectro visible (400-700nm) reflectancia muy baja debido a la absorción de pigmentos fotosintéticos. En la región del infrarrojo cercano de onda corta (700-1300nm) la reflectancia es alta y en la región del infrarrojo medio de onda corta (1400-3000 nm) la reflectancia es media debido a la absorción del agua y otros compuestos. Fuente: Tanda y Chiarabiani (2019).

El valor de NDVI es un número entre -1 y +1 y cuantifica la diferencia relativa entre el reflejo del infrarrojo cercano "pico" y el reflejo rojo "valle" del espectro de la vegetación. Cuando el vigor del viñedo es alto el valor NDVI está cerca de la unidad, mientras que si el nivel de vigor es bajo (Figura 15), el valor NDVI es cercano a cero. Una de las conclusiones que se extrae del estudio de Tanda y Chiarabiani (2019) es que las imágenes multiespectrales tomadas desde un vehículo aéreo no tripulado y los mapas del vigor de la vid (NDVI), fueron

capaces de determinar las distintas zonas de mayor rendimiento pero menor calidad (variabilidad espacial), ofreciendo la posibilidad de realizar una vendimia o procesado selectivo en función de la calidad de la uva.

Además de esta variabilidad espacial del viñedo otros autores (Kazmierski *et al.*, 2011) estudiaron la validez en el tiempo de la variabilidad espacial dentro del viñedo mostrada por el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en dos escalas de tiempo: intra-anual e inter-anual.

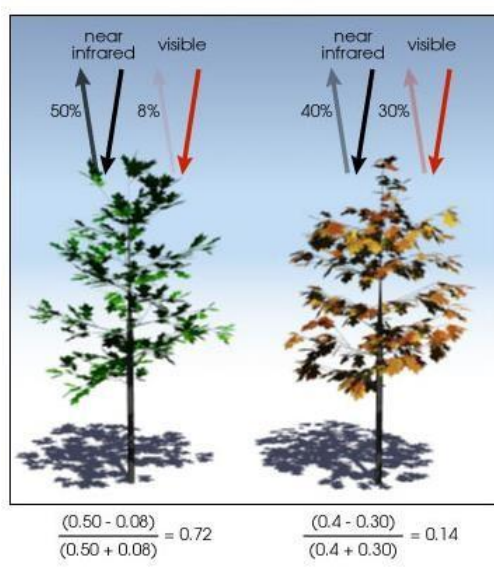


Figura 15. Cálculo NDVI. Valores próximos a la unidad son propios de plantas vigorosas y valores más cercanos a cero son plantas con bajo vigor. Fuente: www.earthobservatory.nasa.gov

En la actualidad la mayoría de las aplicaciones se basan en imágenes adquiridas durante el envero. Esta etapa es de interés ya que la vid ha alcanzado su tamaño final de vegetación (parada de crecimiento) y está cambiando del desarrollo vegetativo al productivo. La mayoría de las aplicaciones del NDVI están orientadas a caracterizar la variabilidad espacial de vigor/rendimiento y hacer una vendimia diferenciada. Este estudio mostró que en viñedos cultivados sin riego adicional, era posible adelantar la fecha de la toma de imágenes al menos 20 días antes del envero, también se pudo usar la información proporcionada por una imagen realizada en envero durante

varios años posteriores (3 a 5 años si en el campo no hay cambios de gestión importantes, principalmente de gestión hídrica). En este mismo estudio se adquirieron imágenes de inicio de la temporada (alrededor de la floración) como una fuente potencial de información para gestionar otras operaciones. Se comprobó así que las imágenes multispectrales tomadas desde una plataforma aérea tuvieron estabilidad en el tiempo dentro de la variabilidad espacial del viñedo.

La realidad actual nos muestra que existen limitaciones en el uso de la teledetección. Estudios como el realizado por Devaux *et al.*, (2019) mostraron que las imágenes tomadas desde plataformas aéreas (satélites) tienen menor resolución temporal. Una posible solución podría ser la reciente disponibilidad de imágenes ofrecidas por el satélite Sentinel-2. Tiene una serie de ventajas como que el periodo de revisita es de 5 días, capta 13 diferentes bandas espectrales, y las imágenes se difunden de manera gratuita. Sin embargo, también tiene sus inconvenientes. En primer lugar, la resolución espacial de las imágenes varía de 10 a 20 m según la banda espectral, lo que puede ser limitante en campos pequeños o con límites complejos. Otra limitación radica en la imposibilidad de obtener píxeles puros de vid, son necesariamente compuestos de píxeles mixtos (vides/ tierra o vides/ cultivo de cobertura cuando entre líneas existe cubierta de vegetal). También, dependiendo de la ubicación en estudio, las condiciones climáticas limitan el número de imágenes que se pueden utilizar (días nublados). Por tanto, los resultados demostraron que todavía hay limitaciones en el uso de las imágenes obtenidas por satélite para monitorizar el vigor del viñedo. En el caso del vehículo aéreo no tripulado (UAV) y plataformas aéreas pudieron ser utilizadas con más frecuencia en el tiempo, pero los costes de este servicio también fueron elevados para la mayoría de las explotaciones vitícolas.

Otros autores (Rey-Caramés *et al.*, 2015) apuntaron en su estudio que los sistemas aéreos a control remoto (RPAS) eran una alternativa interesante a otras plataformas como helicópteros, aviones o satélites, en relación principalmente con la resolución espacial y el coste de adquisición. Pero se siguieron viendo limitados por las condiciones climáticas para el vuelo y por la

difícil diferenciación entre los espectros de vides individuales, el suelo o las hileras entre líneas de viñedo con cubierta vegetal.

Muchos de estos inconvenientes podrían verse solventados con el desarrollo de plataformas terrestres autónomas equipadas con sensores espectrales capaces de abarcar mayor superficie de vegetación en las medidas, con menor limitación de uso por climatología, las imágenes serían de mayor calidad y resolución (se evitan imágenes del suelo del viñedo) los costes podrían ser inferiores y la frecuencia en la toma de imágenes sería a demanda del gestor del viñedo.

En la actualidad ya se comercializan sensores ópticos montados en plataformas terrestres como tractores o aperos del tractor. El N-Sensor Yara (Figura 16(a) y (b)) corresponde a un sensor activo que opera montado en la maquinaria y que mide la reflectancia del cultivo a medida que se va moviendo por el campo. Recoge la reflectancia de la luz en bandas de ondas específicas relacionadas con el contenido de clorofila y la vegetación del cultivo. Cubre un área total de aproximadamente 50 m² /seg y está preparado para realizar mediciones cada segundo operando a velocidades de trabajo normales. Incorpora su propia fuente de luz por lo que permite operar independientemente de las condiciones de luz ambiental, incluso de noche.

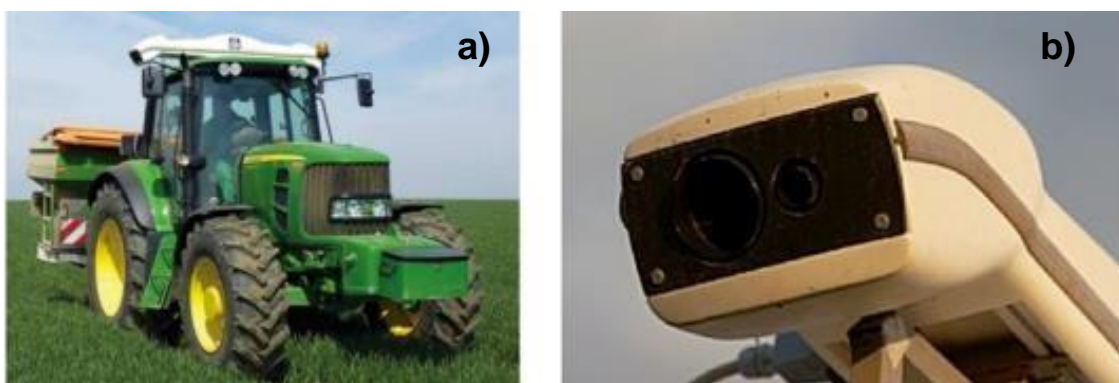


Figura 16. N-Sensor de Yara. (a) El sensor para el cálculo de los índices vegetativos va montado en el techo de tractor. (b) Detalle del sensor. Fuente: Yara Internacional

El GreenSeeker (Figura17), es otro de los sensores comerciales terrestres, lo fabrica NTech Industries y mide el estado nutricional de los cultivos. Los sensores se posicionan en el frente de la maquinaria y perpendiculares al cultivo. La luz generada mediante LED se refleja en el cultivo y se mide para el cálculo del índice NDVI utilizando las bandas rojo y NIR.

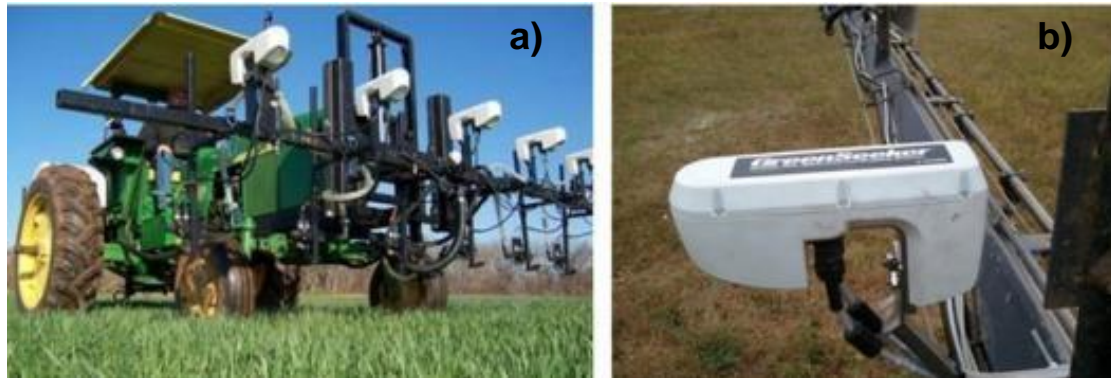


Figura 17. (a) Montaje de sensores GreenSeeker en el frente de la maquinaria. (b) Detalle de sensor, el cual es ubicado en forma perpendicular al cultivo. Fuente: Vellidis y Lincopresicion.

El CropCircle (Figura 18 (a) y (b)) es otro sensor fabricado por Holland Scientific que proporciona los datos de reflectancia del cultivo para calcular índices de vegetación. Entre otras utilidades, la información del sensor se puede utilizar para cuantificar el impacto de los nutrientes, del agua, de las enfermedades u otras condiciones de crecimiento. Se puede montar en cualquier tipo de vehículo para monitorizar de forma remota el cultivo durante la conducción. También posee fuente propia de luz. Destacar de este sensor su tamaño compacto, su bajo peso, que emite una señal con poco ruido, tiene una buena resistencia al polvo y al agua, dispone de una rápida tasa de salida de datos, tiene bajo consumo de energía y su hardware es ligero de peso.

Todos estos sensores comerciales terrestres presentan la desventaja de que todavía su precio de adquisición es elevado, por lo que este equipamiento es difícil de amortizar en muchas explotaciones, especialmente en aquellas situadas en zonas con producciones reducidas.



Figura 18. (a) Montaje de sensores CropCircle en maquinaria. (b) Detalle del sensor, el cual es ubicado en forma perpendicular al cultivo. Fuente: Schepers.

1.9 VEHÍCULOS AUTÓNOMOS EN AGRICULTURA

Las tecnologías RAS (Robotics and Autonomous Systems) tienen el potencial de revolucionar todos los sectores agropecuarios.

En las explotaciones agrícolas actuales se busca incrementar el rendimiento, obtener productos de mayor calidad, producir de manera sostenible, minimizar los costes y depender cada vez menos de la mano de obra del hombre. A su vez, se enfrentan al desafío de producir mayor cantidad de alimentos a partir de menos tierra de manera sostenible, con la perspectiva futura de satisfacer la demanda de una población mundial en aumento (9.8 mil millones de personas en 2050) (Shamshiri *et al.*, 2018).

Esta nueva tecnología, por su forma de trabajar incrementa la productividad y reduce el gasto por lo que aumenta el beneficio económico, social y medioambiental. Según Duckett *et al.*, (2018), la forma en que los robots contribuirán a mejorar cada uno de estos aspectos será:

- **Económicamente:** Cultivando y recolectando de manera más eficiente y económica.
- **Ecológicamente:** Reduciendo y eliminando el uso de productos químicos, mientras que ayuda a mantener el estado del suelo.
- **Socialmente:** Mejorando las condiciones de trabajo del personal de las explotaciones y cambiando el mercado laboral, como oportunidad de

empleo para personal capacitado en la realización de estas nuevas tareas.

Se espera que los vehículos autónomos sean el centro de todas las aplicaciones de la agricultura de precisión. Actualmente, se utilizan vehículos agrícolas automáticos para la detección de malas hierbas, aplicación de fitosanitarios, nivelación del terreno, riego, etc., pero están tripulados. Un rendimiento autónomo de estos vehículos permitiría la supervisión continua del campo, dado que la información sobre el entorno se puede adquirir de forma autónoma, y el vehículo puede realizar su tarea en consecuencia (Cheein y Carelli 2013).

La integración de sistemas robóticos en vehículos autónomos (RAS) ofrece una gran posibilidad para realizar medidas que de otro modo serían imposibles de obtener y de manera autónoma. Los resultados de los muestreos serían inmediatos, recogidos de manera segura para su posterior análisis de forma sistemática y no contaminada. Estos sistemas robóticos, nos permitirían por ejemplo, el mapeo de grandes áreas de cultivo a través de la aplicación de sensores, la monitorización del estado del cultivo a tiempo real, georreferenciación de todos los datos recogidos, visión robótica, etc.

Para ello el vehículo autónomo debe poseer cuatro habilidades básicas pero fundamentales para realizar su función (Cheein y Carelli 2013):

- Orientación, la forma con la que el vehículo navega dentro de su entorno.
- Detección, extracción de características biológicas del entorno.
- Acción, la ejecución de la tarea para que fue diseñado el vehículo.
- Mapeo, la construcción de un mapa de la parcela con sus características más relevantes.

No se trabajaría ya en grandes movimientos de preparación de tierra que requieren una gran cantidad de energía y fuerza, sino en pequeñas preparaciones que pueden llegar a ser incluso 'puntuales' porque también los métodos de siembra serán diferentes.

1.9.1 ¿Por qué utilizar vehículos autónomos en agricultura?

Su principal ventaja es su completa autonomía, esto permite una monitorización muy rápida de superficies grandes de cultivo sin la necesidad de personal capacitado o especializado. Dan soluciones sin la aportación de productos químicos o sin compactar la tierra, con sistemas de propulsión eléctricos que no provocan emisiones. Tienen gran capacidad para procesar y entregar la información a tiempo real, tienen menores limitaciones de uso en condiciones climatológicas adversas en comparación con los sensores colocados en plataformas aéreas, y se podrían asemejar a las plataformas terrestres tripuladas, pero como se muestra en la figura 19, también tienen sus inconvenientes. Los diferentes sensores para monitorizar un cultivo se pueden colocar en los propios vehículos agrícolas u otros diseñados exclusivamente para tal efecto, ambos tienen ventajas, pero también inconvenientes.

EN VEHÍCULOS AGRÍCOLAS

- **VENTAJAS:** Realizan las tareas agrícolas correspondientes a la vez que se monitoriza o se usa la información del sensor para la tarea que se está realizando.
- **INCONVENIENTES:** Esta tecnología no la puede manejar cualquier persona. El conductor debe estar capacitado para el uso de la tecnología, y la monitorización está prácticamente limitada a los elementos en los que el vehículo agrícola esté trabajando en el campo.

EN VEHÍCULOS TERRESTRES TRIPULADOS DISEÑADOS EXCLUSIVAMENTE PARA MONITORIZACIÓN EN CAMPO (buggies, o vehículos todo terreno)

- **VENTAJAS:** Especializados en la adquisición de datos en la planta. La monitorización se puede realizar tantas veces como sea necesario y de una manera más rápida.
- **INCONVENIENTES:** Aumenta los costes extra al de los sensores como son el propio vehículo, la necesidad de una persona para conducir el vehículo y para controlar los dispositivos.

Figura 19. Ventajas e inconvenientes de la instalación de sensores en plataformas terrestres tripuladas (vehículos no autónomos). Fuente: Gutierrez S. (2019) PhD Tesis

De esta manera se ha llegado en los últimos años al desarrollo de diferentes plataformas robóticas autónomas para el uso en viñedo y otros cultivos. Como se ha comentado anteriormente (Duckett *et al.*, 2018) los robots son el futuro en la agricultura, ya que pueden actuar de forma autónoma para una amplia gama de aplicaciones en el campo.

En viticultura existen algunos prototipos de vehículos autónomos para monitorización del viñedo principalmente. Entre ellos:

- Wall-Ye (Figura 20(a)), prototipo de robot para mapeo de viñedo, poda y posible vendimia (wall-ye.com).
- GRAPE (Figura 20(b)), robot para monitorización de viñedos y protección, capaz de distribuir por el viñedo dispensadores de feromonas para la interrupción del apareamiento de la polilla del racimo (grape-project.eu).
- VinBot (Figura 20(c)), un robot móvil todo terreno con sensores avanzados para la adquisición y el análisis de imágenes y datos 3D para determinar el rendimiento del viñedo y compartir la información con los viticultores (vinbot.eu).
- Vinescout (Figura 20(d)), monitorización del viñedo y mapeado para determinar el estado hídrico y vigor del viñedo a tiempo real (vinescout.eu).
- VineRobot (Figura 21), un robot equipado con avanzados sensores e inteligencia artificial para monitorizar el estado del viñedo y el procesado de los datos (vinerobot.eu).

Todos ellos, son prototipos de diferentes proyectos de investigación, equipados con diferentes tipos de sensores tanto para maniobras automáticas como para monitorización de las plantas: detección de luz y rango (LIDAR) para detección de obstáculos, sensores de fluorescencia para la evaluación del estado de la vid, cámaras térmicas para la determinación del estado hídrico,

etc. (Gutierrez S. 2019 PhD Tesis). Actualmente la mayor parte de esta tecnología está todavía en desarrollo y la mayoría de ellos son prototipos.

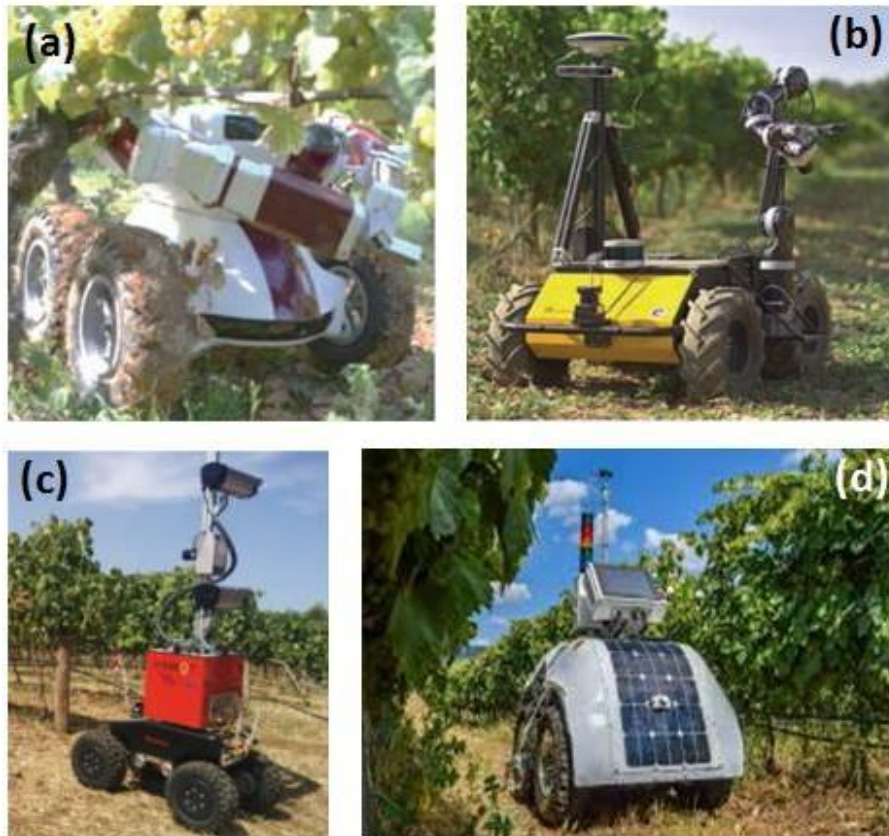


Figura 20. Imágenes de algunos prototipos de vehículos autónomos a) Wall-Ye (wall-ye.com), b) GRAPE (grape-project.eu), c) VinBot (vinbot.eu), d) VineScout (vinescout.eu). Fuente: Shamshiri *et al.*, 2018 y <http://vinescout.eu/>



Figura 21. VineRobot (vinerobot.eu). Fuente: <http://www.vinerobot.eu/>

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue la instalación de sensores próximos en un vehículo autónomo, así como su evaluación, validación y realización de medidas para su empleo en la monitorización no invasiva del viñedo, con dos objetivos específicos:

1. La monitorización no invasiva del estado hídrico del viñedo.
2. La monitorización no invasiva del vigor del viñedo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 VIÑEDO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se llevó a cabo en un viñedo comercial en la Quinta do Ataíde (Junqueira, Portugal), (Lat. 41° 14' 41.1 ", Long. 7° 0.6' 52.9", Alt.151 m) durante los días 18 y 19 de julio en la temporada 2018. La parcela (Figura 22) es propiedad de la empresa Symington Family States (www.symington.com) que participa en el proyecto europeo VineScout (vinescout.eu), marco en el que se realizó el estudio.

La variedad del viñedo es Touriga nacional plantada en 2014. La orientación del viñedo es norte/sur. El sistema de conducción es en espaldera y con un marco de plantación de 2.5 × 1.2 m. El clima de esta zona es cálido y seco, con una temperatura media anual de 16°C y precipitación media de 536 mm al año.

Para llevar a cabo el estudio experimental, se seleccionaron cinco filas de la parcela con tres áreas diferentes de vigor de acuerdo a los valores de NDVI tomados con un vuelo comercial con dron en la semana anterior a las fechas de medida (Figura 22).

La monitorización del viñedo y toma de datos de referencia fue llevada a cabo por la mañana, momento "morning" (10:00 A.M.) durante los días 18 y 19 de julio.

Las cinco filas seleccionadas, como se aprecia en la Figura 22, fueron: la 11, 14, 16, 23 y 32. Cada fila se dividió en 21 bloques (B01, B02, ..., B21) (Figura 23) y posteriormente se seleccionaron 10 para realizar el estudio experimental. Cada bloque estuvo constituido por 5 cepas.

Las cinco filas fueron monitorizadas por el robot autónomo de forma continua a una velocidad constante de 1,5 Km/h por la cara sur de la vegetación durante la mañana. Los valores de los parámetros recogidos por el robot autónomo fueron la **temperatura** de la vegetación para la estimación del estado hídrico y el índice de **NDVI** para la estimación del vigor.

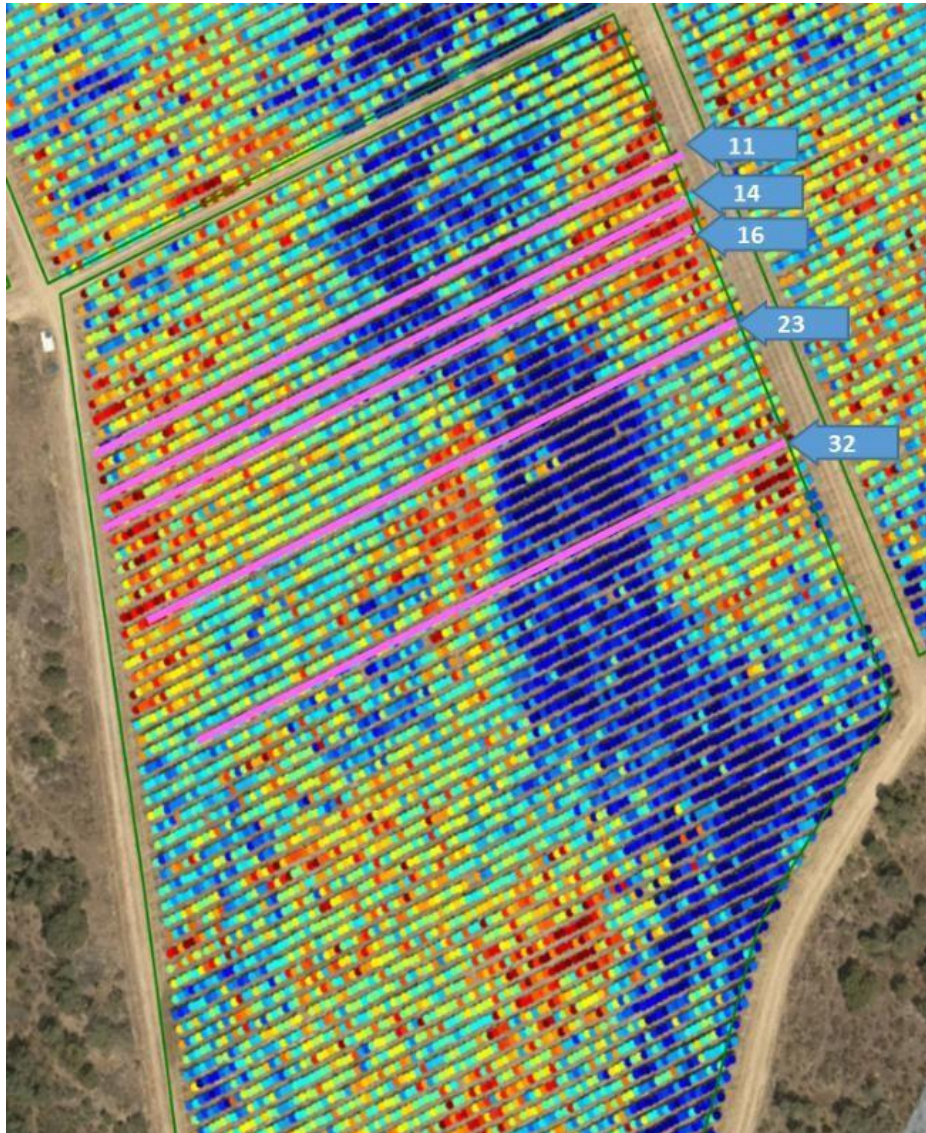


Figura 22. Finca en Quinta do Ataíde, Junqueira, Julio de 2018. Selección de las filas para el diseño del estudio. Los colores azules representan valores de alto vigor mientras los amarillos a rojos valores de bajo vigor.

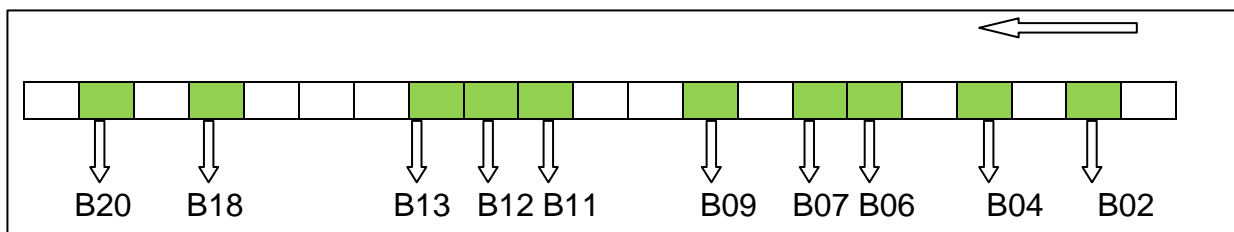


Figura 23. Bloques seleccionados en el estudio experimental. En cada una de las filas se marcaron los mismos bloques.

3.2 MEDICIÓN NO INVASIVA DEL ESTADO HÍDRICO Y VIGOR DE LA CEPA. SENSORES EMPLEADOS

3.2.1 Medición del estado hídrico

La monitorización del estado hídrico del viñedo se llevó a cabo mediante un sensor termográfico (Figura 24). Las medidas de temperatura de la parte aérea de la vegetación, se realizaron con un sensor radiométrico infrarrojo SI-421 (Apogee instrument Inc., Utah, EE. UU) montado sobre el robot autónomo. El sensor radiométrico se posicionó a una distancia de la vegetación de unos 50 cm y una altura de 1.08 m del suelo (Figura 26). El área de medida del sensor es de 25 cm de diámetro. La frecuencia de adquisición de medidas del sensor fue de dos medidas por segundo aproximadamente (~2 Hz).

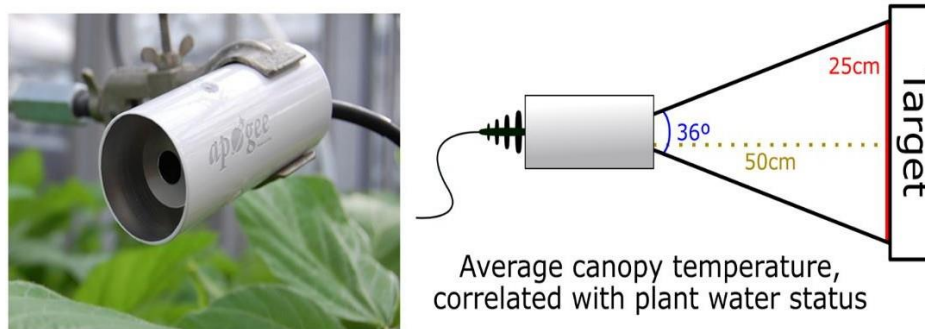


Figura 24. Sensor radiométrico infrarrojo SI-421 (Apogee instrument Inc., Utah, EE. UU)

3.2.2 Medición del vigor

La monitorización del vigor de forma no invasiva desde el vehículo autónomo se llevó a cabo con una cámara multispectral. Las imágenes multispectrales tomadas por el robot autónomo, se adquirieron en continuo (*on-the-go*) utilizando una cámara multispectral OCITM - M (Bay Spec Inc., San José, Estados Unidos). La cámara mide la reflectancia de la hoja en diferentes bandas espectrales. Presenta 8 bandas espectrales que cubren desde la región VIS hasta la región del infrarrojo cercano (SW-NIR), su tamaño es muy reducido (8 cm x 6 cm x 6 cm), pesa ~ 190 g y dispone de una alta tasa de transferencia de datos de hasta 120 fps (Figura 25).

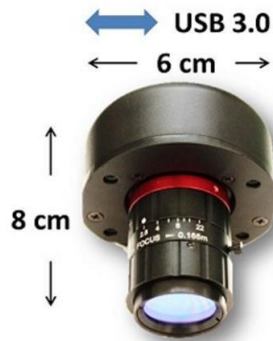


Figura 25. Figura 24: OCITM – M Cámara Multiespectral con 8 bandas espectrales (470 nm, 560 nm, 670 nm, 720 nm, 780 nm, 840 nm, 900 nm and 970 nm).

La cámara se montó en el vehículo autónomo a una altura de 0,85 cm desde el suelo y la distancia a la vegetación de las cepas fue de aproximadamente unos 60 cm (Figura 26). Se prestó especial atención para asegurar que el área de medida definida en la vegetación estuviera completamente dentro de la imagen recogida con la cámara multiespectral. Posterior a su adquisición, los datos espectrales se filtraron, se analizaron y se compararon las medidas de referencia de vigor y estado nutricional del viñedo.

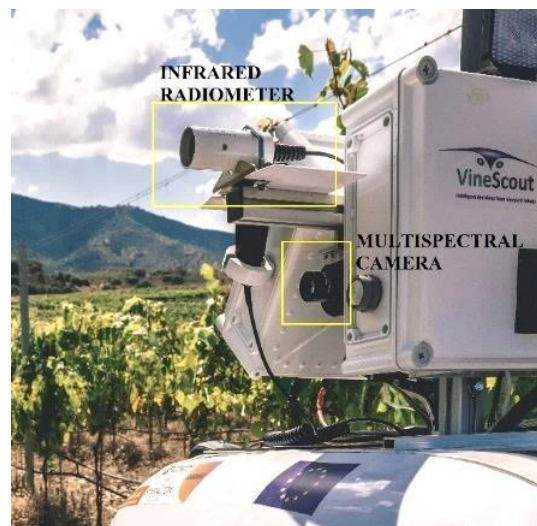


Figura 26. Sensores no invasivos montados en VineScout: radiómetro infrarrojo para medir la temperatura de la vegetación y evaluar el estado hídrico y cámara multiespectral para evaluar el vigor de la vid.

3.3 VEHÍCULO AUTÓNOMO (ROBOT)

El vehículo autónomo objeto de este estudio es el denominado “VineScout”, un prototipo de vehículo autónomo terrestre. Su desarrollo se enmarca en un proyecto europeo H2020 en el que colabora un consorcio formado por la Universitat Politècnica de València (<http://robotagri-lab.webs.upv.es/>), Wall-Ye SARL (<http://wall-ye.com/>) empresa francesa especializada en crear y comercializar robots para la agricultura y particularmente para la viticultura, la Universidad de La Rioja a través del grupo de investigación Televitis (<https://televitis.unirioja.es/>) y Symington Family States (<https://www.symington.com/>), empresa portuguesa propietaria de los viñedos donde se realizan las pruebas del vehículo autónomo e interesada en incorporar esta tecnología para el manejo de sus viñedos.

El robot VineScout se centra en evaluar el estado hídrico y nutricional del viñedo de forma autónoma y automatizada.

La mayoría de los robots desarrollados para su empleo en viticultura, están orientados hacia la realización de tareas pesadas como poda, siembra o cosecha. Hoy en día, se considera que la información es algo esencial para facilitar a los productores la toma de decisiones sobre sus cultivos (Saiz-Rubio *et al.*, 2018). Por eso la monitorización del viñedo con el robot autónomo VineScout es una importante herramienta que aporta numerosa información para la toma de decisiones con respecto al manejo de la vegetación del cultivo y a las prácticas de riego.

Las dimensiones externas del vehículo autónomo VineScout son de 0.90 metros de ancho, 1.40 metros de largo y 1.20 metros de alto (con la antena GPS doblada) (Figura 27). El robot está alimentado por dos baterías de litio eléctricas de 12 voltios, que generan un circuito de 24 V, reducido a 12 V cuando es necesario. Las mediciones instantáneas de voltaje se envían a la computadora principal para que el robot conozca la energía que le queda. El robot también está equipado con dos paneles solares con 128 V en total, que están pensados solo para ocasiones de emergencia, como enviar un mensaje

de alerta en caso de batería baja. Las cuatro ruedas funcionan con un motor eléctrico cada una.



Figura 27. Imagen del robot VineScout preparado para la toma de datos en viñedo en Quinta do Ataíde, Junqueira (Portugal).

Las tecnologías de navegación que utiliza el robot autónomo VineScout son la visión artificial, LIDAR y sensores ultrasónicos. También está equipado con un sistema de posicionamiento global (GPS SX-Blue, Geneq Inc., Montreal, Quebec, Canadá) que proporciona referencias globales para los mapas.

3.4 MEDIDAS DE REFERENCIA

3.4.1 Medición del estado hídrico

Para la determinación del estado hídrico del viñedo, se utilizó el potencial hídrico de hoja como método de referencia en las cinco filas mencionadas anteriormente (filas 11,14, 16, 23 y 32). Se midieron tres hojas (una hoja por planta, figura 28) de cada uno de los 10 bloques seleccionados, obteniendo un total de 150 medidas por cada día de estudio experimental. Las mismas filas que se monitorizaron con el robot autónomo, se evaluaron en el momento “morning” (10:00 A.M) en ambos días.

El potencial hídrico de la hoja se determinó utilizando la cámara de presión de Scholander (Modelo 600, PMS Instrument Company, Albany, OR, EE. UU.)

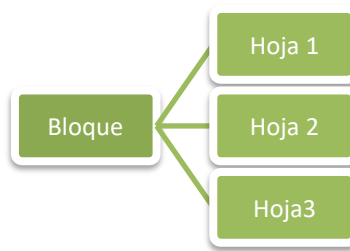


Figura 28. Esquema de medida del potencial hídrico de hoja. Medición de 3 hojas por cada uno de los diez bloques pertenecientes a las cinco filas de estudio.

3.4.2 Medida del vigor y estado nutricional

Para la medición del vigor y del estado nutricional del viñedo se utilizaron como índices de referencia el NDVI (índice espectral), CHL y NBI (ambos son índices de fluorescencia de la clorofila). Se seleccionaron para la medida de referencia del vigor tres de las cinco filas anteriores (filas 11, 14 y 16) y de cada una de ellas se tomaron dos plantas por bloque, en las que se midieron dos hojas por planta (Figura 29). Un total de 120 medidas de referencia para el NDVI, CHL y NBI fueron realizadas en cada día del estudio experimental en el momento “morning” (10:00 A.M.)

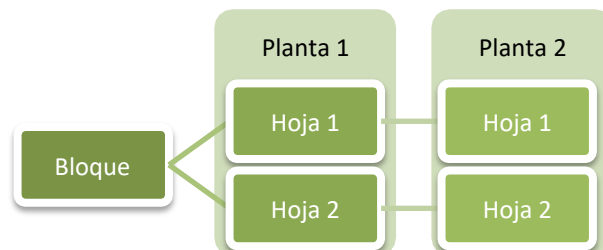


Figura 29. Esquema de medida de los índices de referencia del Vigor y el estado nutricional. Medición de 4 hojas por cada uno de los diez bloques pertenecientes a las tres filas de estudio.

Los sensores portátiles que se utilizaron para la toma de medidas de referencia fueron el Plant Pen NDVI 300 (Photon Systems Instruments, Drásov, República Checa) (Figura 30(a)), que es un dispositivo portátil basado en la reflectancia que se utilizó como referencia para medir el NDVI y el Dualex Scientific (Force-A, Orsay, Cedex, Francia) (Figura 30(b)), que determina los índices CHL y NBI.

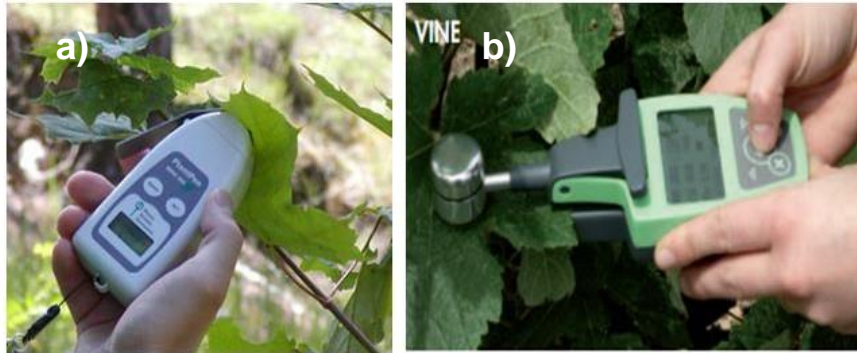


Figura 30. Métodos de referencia para medir el vigor y el estado nutricional de la vid: (a) Plant Pen NDVI 300, (b) Force-A Dualox Scientific.

3.5 DATOS ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Otros datos que se tuvieron en cuenta como referencia de las condiciones atmosféricas para cada uno de los días del estudio, fueron la temperatura del aire y la humedad relativa. Ambos parámetros fueron cedidos por la estación meteorológica más próxima a la ubicación del viñedo experimental. Esta estación meteorológica registró medidas de esos parámetros cada 15 minutos a lo largo de todo el día.

3.6 ANÁLISIS DE DATOS

Para mostrar la dispersión de los datos obtenidos en el estudio experimental, se realizaron diagramas boxplot en los que se evaluaron cada una de las variables medidas por el robot (NDVI y T^a vegetación) y las variables de referencia (potencial hídrico (MPa) NDVI, CHL, NBI). Para ello se empleó el programa InfoStat, versión 2018.

Para estudiar la relación existente entre las medidas de temperatura realizadas con el sensor y el potencial hídrico medido con la cámara de presión, así como las medias de NDVI aportada por el robot con las medidas de referencia del vigor, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) empleando Excel, versión 1902 (Office 365, España).

Finalmente, se realizó un estudio sobre la correlación existente entre el potencial hídrico medido con la cámara de Scholander, y el potencial hídrico esperado mediante el uso del sensor radiométrico, los índices térmicos CWSI e IG, los datos aportados por la estación meteorológica de temperatura del aire (°C) y la humedad relativa (RH%). Para ello se realizó un análisis de correlación multivariante empleando el software The Unscrambler (CAMO ASA, Noruega).

3.6.1 Generación de modelos matemáticos

Se generaron modelos matemáticos de regresión lineal en los que se evaluó la relación de dependencia entre dos variables. El grado de relación de estas dos variables cuantitativas lo aportó el coeficiente de correlación de Pearson. Para los modelos de potencial hídrico, se relacionaron el potencial hídrico con la temperatura de la vegetación y con cada uno de los índices térmicos. Para los modelos del vigor se relacionaron el NDVI medido por el robot con las medidas de referencia de NDVI, CHL y NBI.

Para el estado hídrico, también se utilizaron modelos de regresión multivariante. Se realizó un filtrado y tratamiento de los datos de Excel, y los modelos se generaron mediante validación cruzada. Se correlacionaron un número determinado de variables con una sola, la variable a predecir (el potencial hídrico). Las variables que se correlacionaron fueron la temperatura de la vegetación medida por el sensor radiométrico, el NDVI medido por la cámara multiespectral, la mediana y desviación típica de las temperaturas medidas, los índices térmicos CWSI e IG, la temperatura del aire y la humedad relativa. Se realizó un pretratamiento por mínimos cuadrados parciales (PLS). Todas las variables se combinaron hasta encontrar aquellos modelos que presentaron los valores más altos del coeficiente de correlación de validación cruzada (rv. cruzada) junto con los valores más bajos del error cuadrático medio de validación cruzada (RMSECV) y del número de variables latentes del modelo para predecir el potencial hídrico de foliar.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ESTADO HÍDRICO DEL VIÑEDO

a) Diagramas boxplot

Los diagramas boxplot mostraron la distribución de los datos que se utilizaron para el estudio del estado hídrico del viñedo. Estos datos son los de temperatura de la vegetación medida con el sensor radiométrico y el potencial hídrico de referencia medido con la cámara de Scholander. Por un lado, se comparó la distribución de los datos en los días 18 y 19 de julio y por otro la distribución de la totalidad de los datos.

Para la temperatura de la vegetación tomada por el robot con el sensor radiométrico (Figura 31(a)) se observó una clara diferencia entre la temperatura de ambos días. El día 18 se alcanzó un máximo de temperatura de 30,59°C y un mínimo de 24,38°C. En cambio, el día 19 presentó temperaturas más frescas con un máximo de 24,66°C. La distribución general de los datos de temperatura de la vegetación presenta cierta asimetría teniendo mayor concentración de datos en la parte superior de la caja (Figura 31(b)).

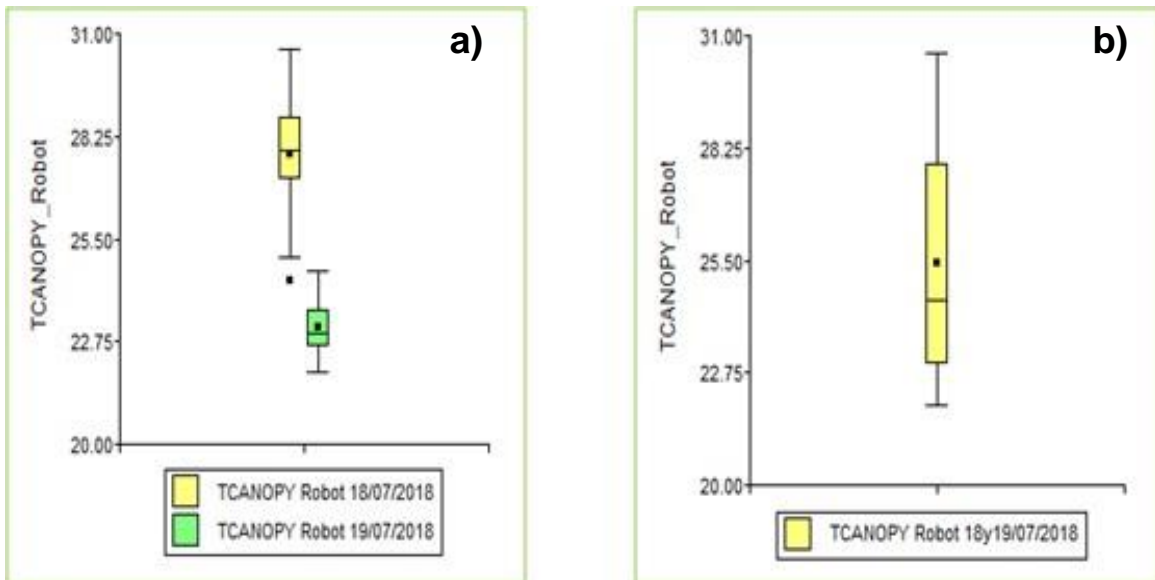


Figura 31. Diagramas boxplot de la temperatura de la vegetación, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.

Los datos de los diagramas para el potencial hídrico tomado como referencia y medido con la cámara de Scholander, presentan una distribución coherente respecto a los datos anteriores de temperatura de la vegetación.

Los valores de potencial hídrico del día 18 son, en general, más negativos que los del día 19 (Figura 32(a)), ya que la temperatura de la vegetación fue también más elevada el día 18 que el 19. En la representación de la distribución conjunta de los datos de ambos días (Figura 32(b)), presenta una distribución bastante simétrica coincidiendo prácticamente el dato de la media y la mediana (-0,83 MPa y -0.82 MPa) respectivamente.

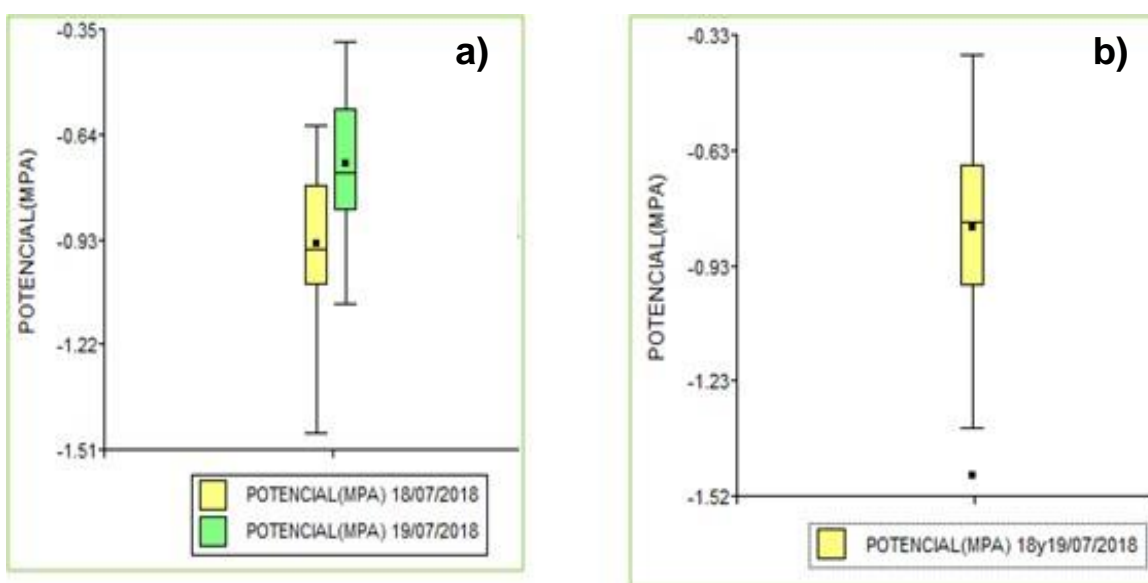


Figura 32. Diagramas boxplot del potencial hídrico (MPa), (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.

b) Modelos de correlación simple

Se desarrollaron modelos de correlación utilizando las variables recogidas cada día por separado (18 y 19 de julio). Y otros modelos con la combinación de las variables de ambos días en uno solo.

Estos modelos mostraron que los coeficientes de correlación de Pearson (r) son en general bajos, es decir, no existe una buena correlación entre el potencial hídrico y la temperatura de la vegetación. Además, se comprobó que los índices térmicos (CWSI, e Ig), no mejoraron la correlación.

Datos día 18 de julio 2018

Las correlaciones que se obtuvieron con los datos del día 18 mostraron una relación débil entre las variables. El coeficiente de correlación más alto lo presenta el modelo que relaciona el potencial hídrico y la temperatura de la vegetación ($r=0.142$) (Figura 33(a)). Las correlaciones con los índices térmicos (Figuras 33(b) y (c)) no favorecen la relación entre las variables.

Datos día 19 de julio 2018

Para el día 19 de julio, los resultados fueron similares al día anterior, con una leve mejoría en el coeficiente de correlación de Pearson (r) en todos los modelos (Figuras 34(a), (b) y (c)). La tendencia de la correlación es que el aumento de la temperatura de la vegetación lleva a valores más negativos al potencial hídrico.

Datos días 18 y 19 de julio 2018

Con la combinación de los datos de ambos días, cabe destacar que la correlación para el modelo que relaciona T^a de la vegetación y potencial hídrico (Figura 35(a)) se vuelve moderada alcanzando un valor de $r = 0,453$, los otros dos modelos (Figuras 35(b) y (c)) siguen la misma tendencia que para el día 19.

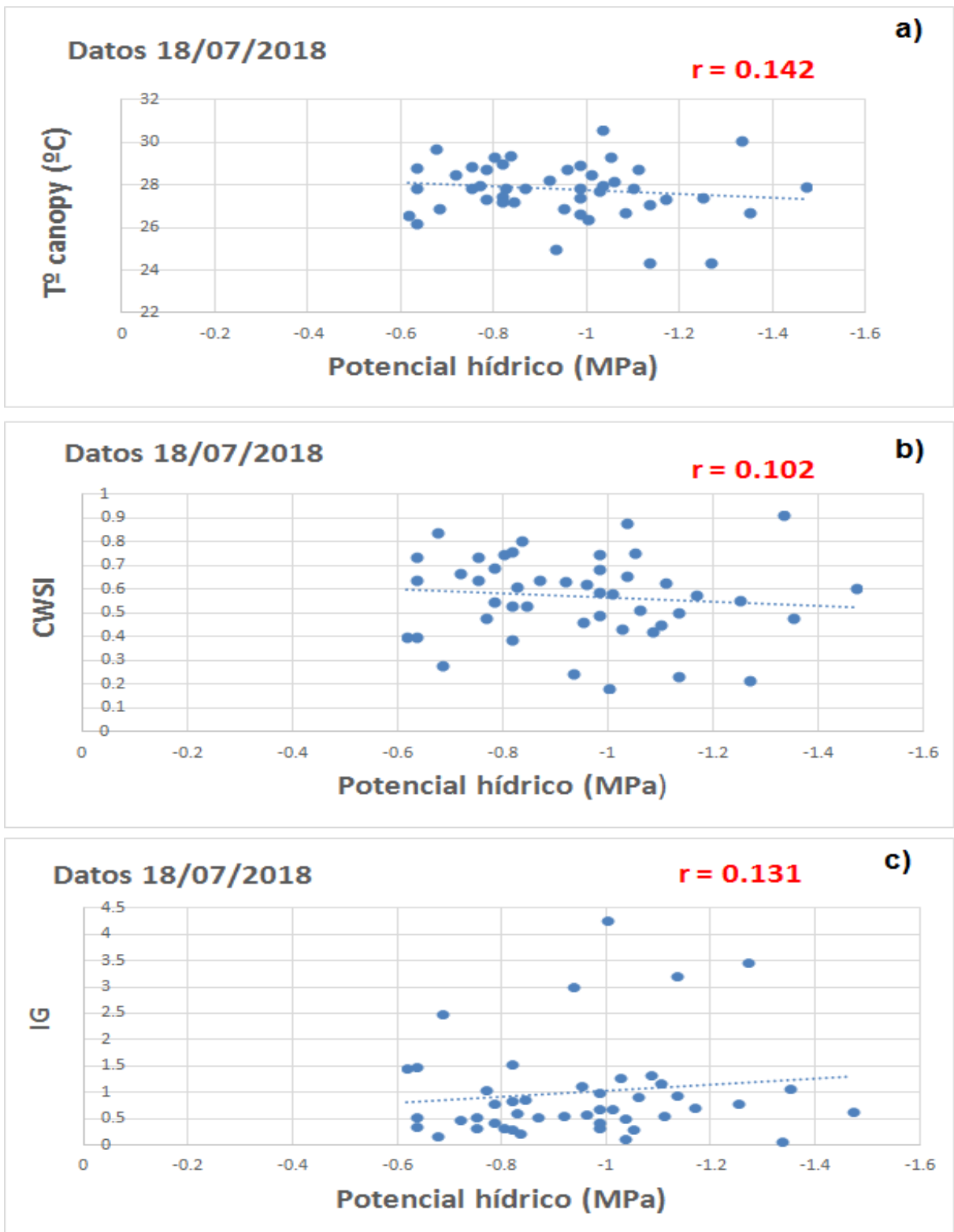


Figura 33. Correlaciones del 18/07/19, (a) entre la T^a de la vegetación y el potencial hídrico (MPa), (b) entre el índice CWSI y el potencial hídrico (MPa) (c) entre el índice Ig y el potencial hídrico (MPa).

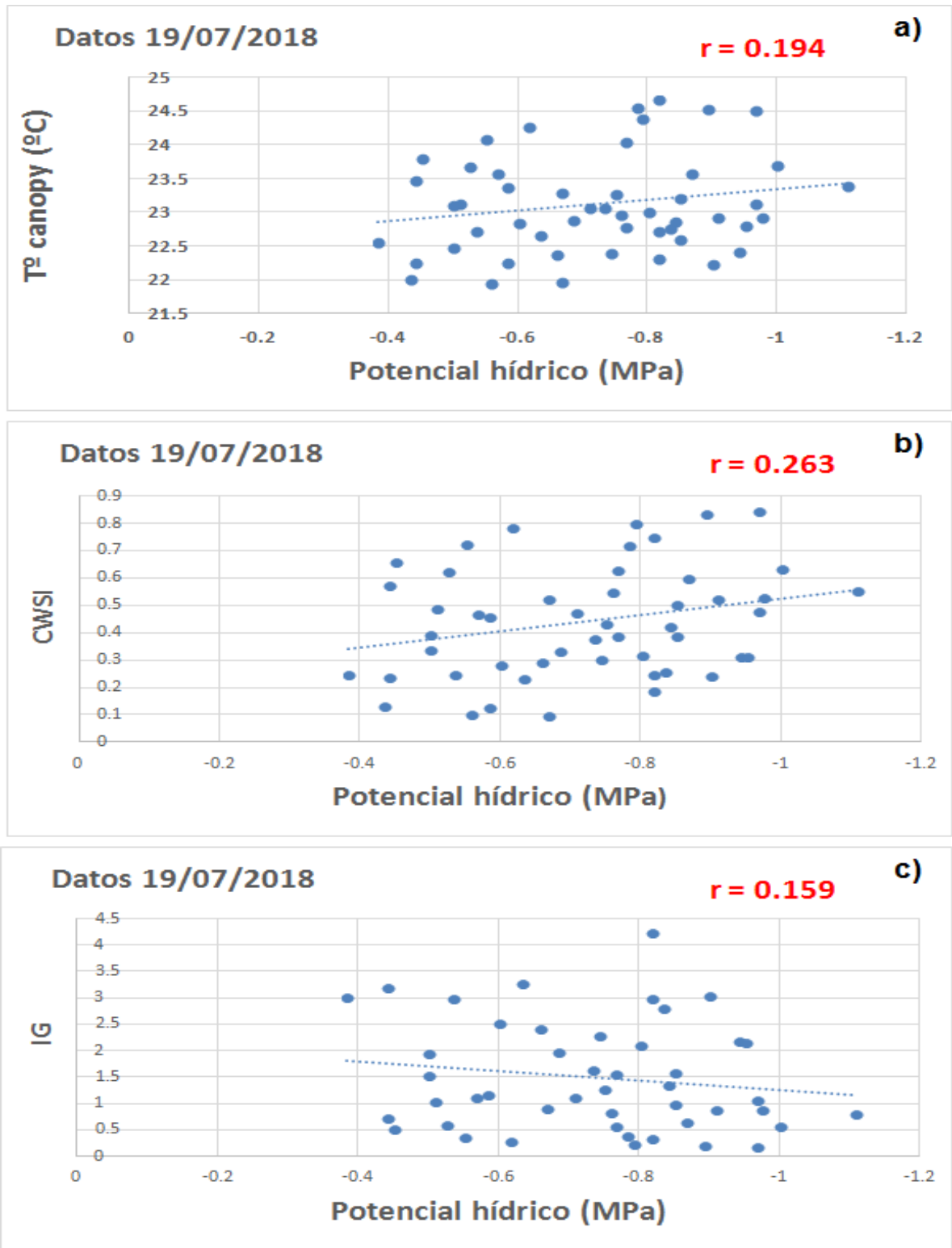


Figura 34. Correlaciones del 19/07/19, (a) entre la T^a de la vegetación y el potencial hídrico (MPa), (b) entre el índice CWSI y el potencial hídrico (MPa) (c) entre el índice Ig y el potencial hídrico (MPa).

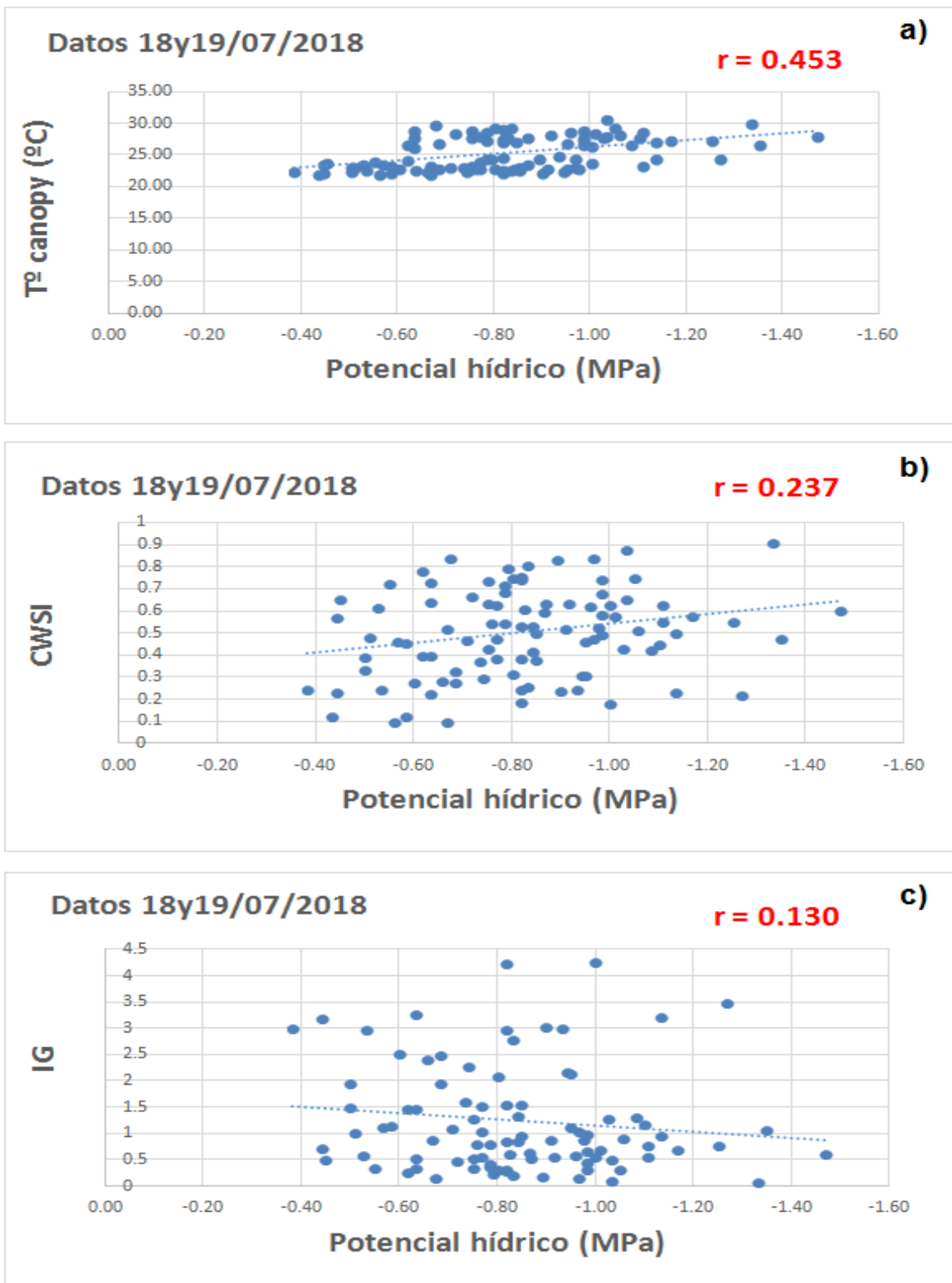


Figura 35. Correlaciones de los días 18y19/07/19, (a) entre la T^a de la vegetación y el potencial hídrico (MPa), (b) entre el índice CWSI y el potencial hídrico (MPa) (c) entre el índice Ig y el potencial hídrico (MPa).

c) Modelos análisis multivariante

Debido a las bajas correlaciones que se obtuvieron, se decidió realizar un análisis multivariante.

Las variables utilizadas para construir los modelos matemáticos fueron los datos recogidos por el robot con la cámara multiespectral (NDVI) y el sensor radiométrico Apogee (temperatura de la vegetación), los cálculos de la mediana de la temperatura de la vegetación, la desviación típica de la temperatura de la vegetación, los índices térmicos CWSI e IG, y finalmente los datos aportados por la estación meteorológica de temperatura del aire (°C) y humedad relativa (RH%).

Se desarrollaron un elevado número de modelos de regresión multivariante, en el que teniendo en cuenta el número de variables, se estudió la correlación entre el potencial hídrico foliar medido, frente al potencial hídrico foliar predicho. Para ello, se realizó una validación cruzada.

Se continuó aplicando las dos estrategias utilizadas hasta ahora para evaluar el comportamiento de los modelos. En primer lugar, se desarrollaron los modelos utilizando las variables recogidas de cada día por separado (18 y 19 de julio), mientras que la segunda estrategia resultó de la combinación de ambos días en un mismo modelo.

Para encontrar las mejores correlaciones se elaboraron modelos con tres, cuatro, seis y ocho variables para cada una de las dos estrategias.

Datos días 18 de julio 2018

Se realizó el primer modelo con ocho variables (Figura 36), y los estadísticos del modelo mostraron valores como el coeficiente de validación cruzada (rv. cruzada = 0.08) demasiado bajos para poder ser utilizado como modelo de predicción.

Las ocho variables que se utilizaron en este caso fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, mediana de la T^a vegetación, desviación estándar de la T^a vegetación, índice térmico CWSI, índice térmico IG, T^a aire, humedad relativa.

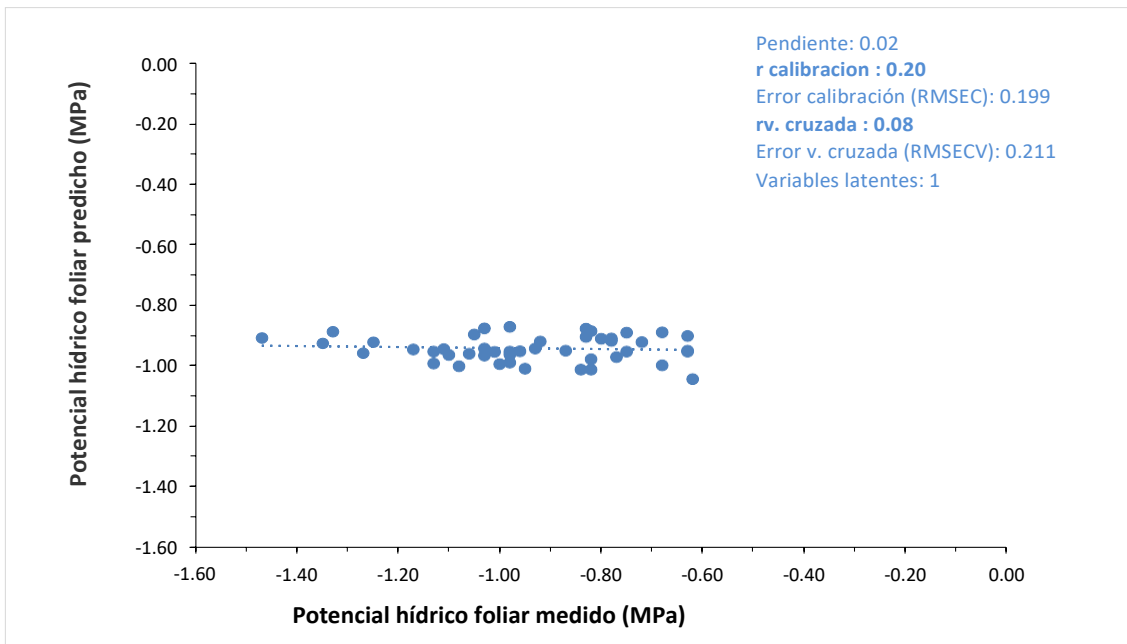


Figura 36. Análisis multivariante de 8 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG, T^a aire, humedad relativa), 18 de julio 2108.

Se buscó otra combinación de variables para mejorar las correlaciones, un modelo elaborado con seis variables (Figura 37), con el que solamente se consiguió mejorar el coeficiente de validación cruzada (rv. cruzada = 0,22).

Las seis variables que se utilizaron en este caso fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, mediana de la T^a vegetación, desviación estándar de la T^a vegetación, índice térmico CWSI, índice térmico IG.

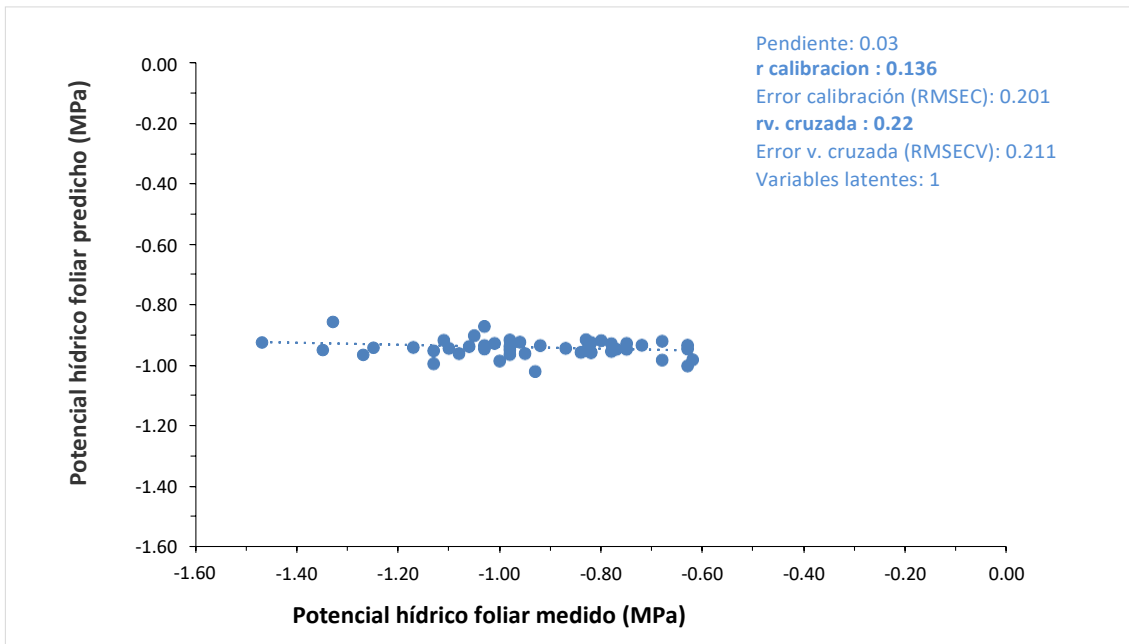


Figura 37. Análisis multivariante de 6 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG), 18 de julio 2108.

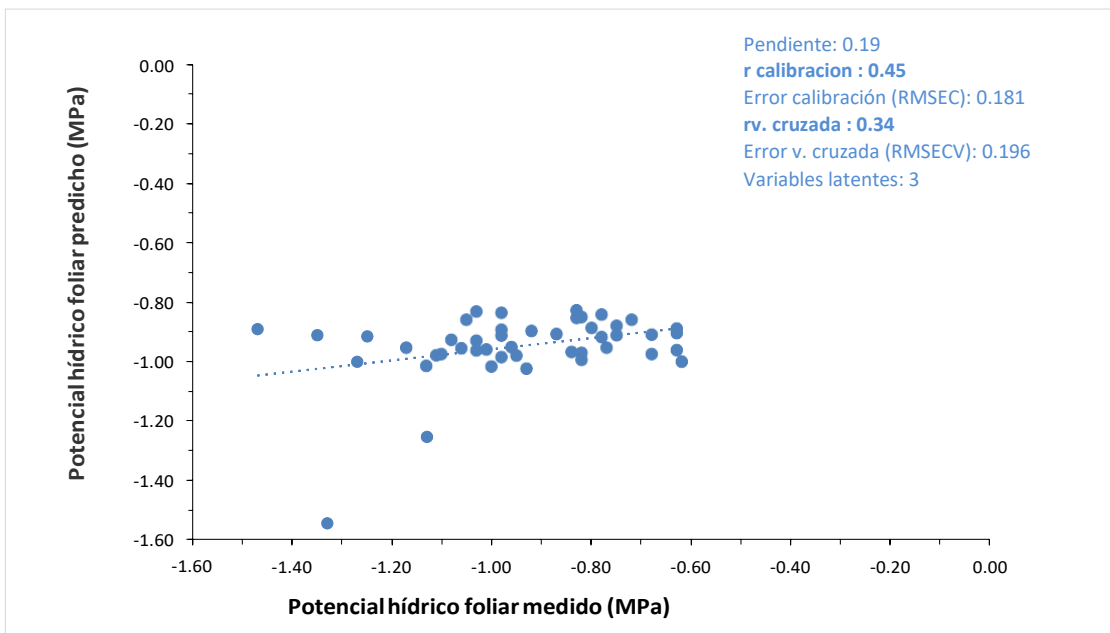


Figura 38. Análisis multivariante de 4 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, T^a aire, humedad relativa), 18 de julio 2108.

Los mejores resultados obtenidos para el día 18 de julio fueron alcanzados con el modelo de cuatro variables.

Las cuatro variables que se tuvieron en cuenta fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, T^a aire, humedad relativa.

En la figura 38, se muestra que los estadísticos del modelo de regresión multilineal fueron superiores (rv. cruzada = 0,34).

Por último, el modelo que se elaboró con tres variables (Figura 39) también se descarta como buen modelo para la predicción ya que no mejora los valores de las anteriores correlaciones.

Las tres variables fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, índice térmico CWSI.

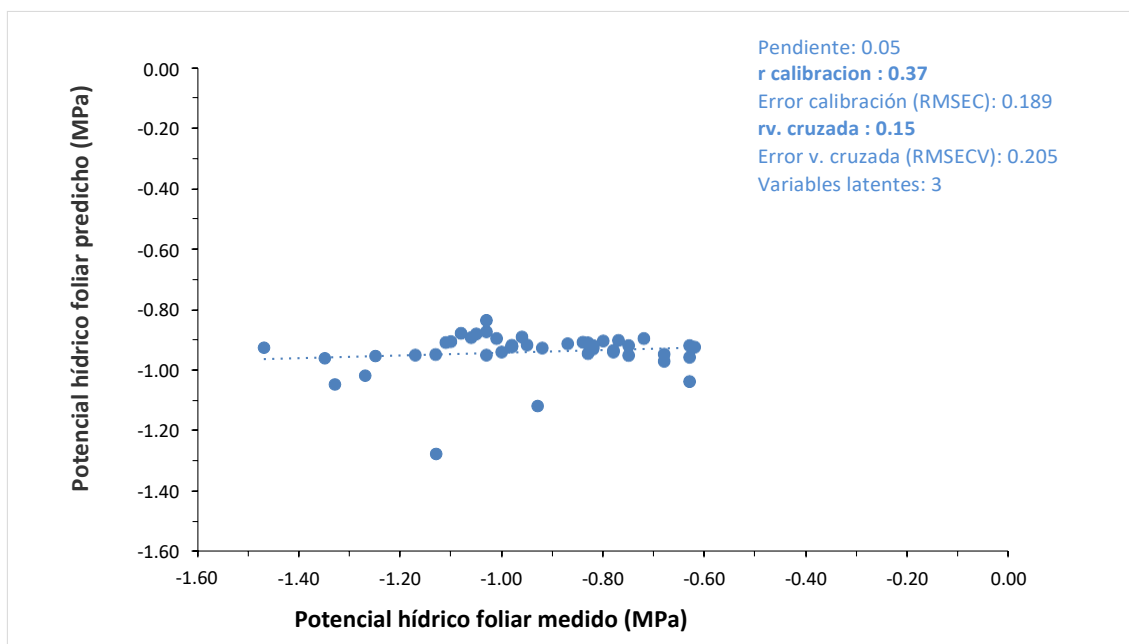


Figura 39. Análisis multivariante de 3 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, CWSI), 19 de julio 2108.

Datos días 19 de julio 2018

Los resultados obtenidos para el día 19 de julio con ocho variables reflejan unos estadísticos (rv. cruzada = 0,34) ligeramente superiores a los obtenidos para el día 18 de julio.

Las ocho variables que se utilizaron en este caso fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, mediana de la T^a vegetación, desviación estándar de la T^a vegetación, índice térmico CWSI, índice térmico IG, T^a aire, humedad relativa.

El ajuste de las muestras a lo largo de la recta de regresión fue ligeramente superior moviéndose en un rango inferior de potencial hídrico foliar de entre -0.4 y -1.1 MPa (Figura 40).

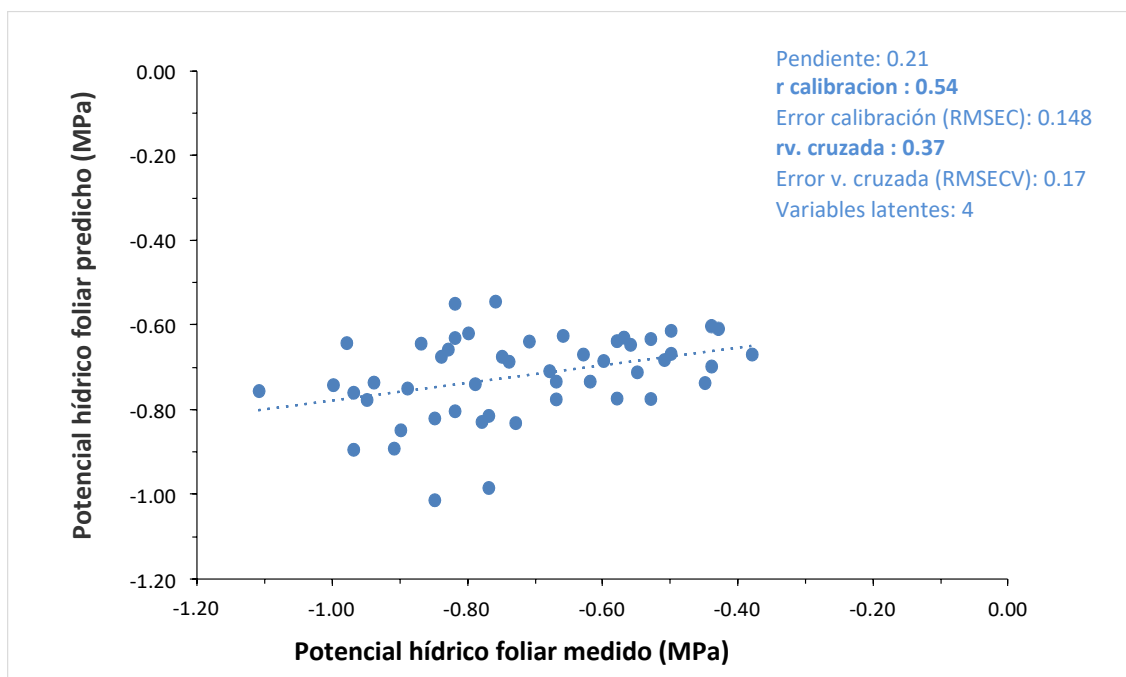


Figura 40. Análisis multivariante de 8 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG, T^a aire, humedad relativa), 19 de julio 2108.

Para intentar mejorar las correlaciones y simplificar el modelo con combinaciones de menor número de variables se desarrolló otro modelo con seis variables (Figura 41). En este modelo se mejoró el coeficiente de correlación de validación cruzada con un valor de 0.41 y el error cuadrático

medio de validación cruzada se acercó a -0.16 MPa con un muy reducido número de variables latentes (3).

Las seis variables que se tuvieron en cuenta fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, mediana de la T^a vegetación, desviación estándar de la T^a vegetación, T^a aire, humedad relativa.

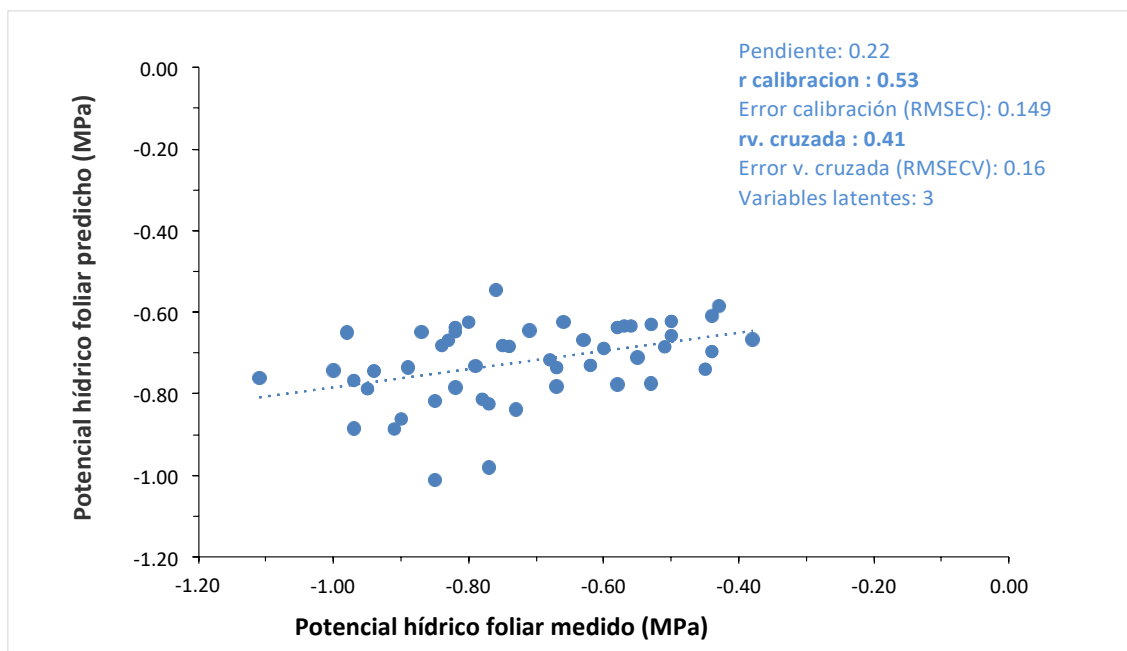


Figura 41. Análisis multivariante de 6 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, mediana, desviación, T^a aire, humedad relativa), 19 de julio 2108.

Para el modelo de 4 variables, se obtiene un coeficiente de validación cruzada menor que los anteriores (rv. cruzada = 0,39), pero el error cuadrático medio de validación cruzada se mantiene en torno a los mismos valores que los otros modelos. Se logra simplificar el número de variables, pero no mejora los anteriores modelos (Figura 42).

Las cuatro variables que se empleadas fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, mediana de la T^a vegetación, desviación estándar de la T^a vegetación.

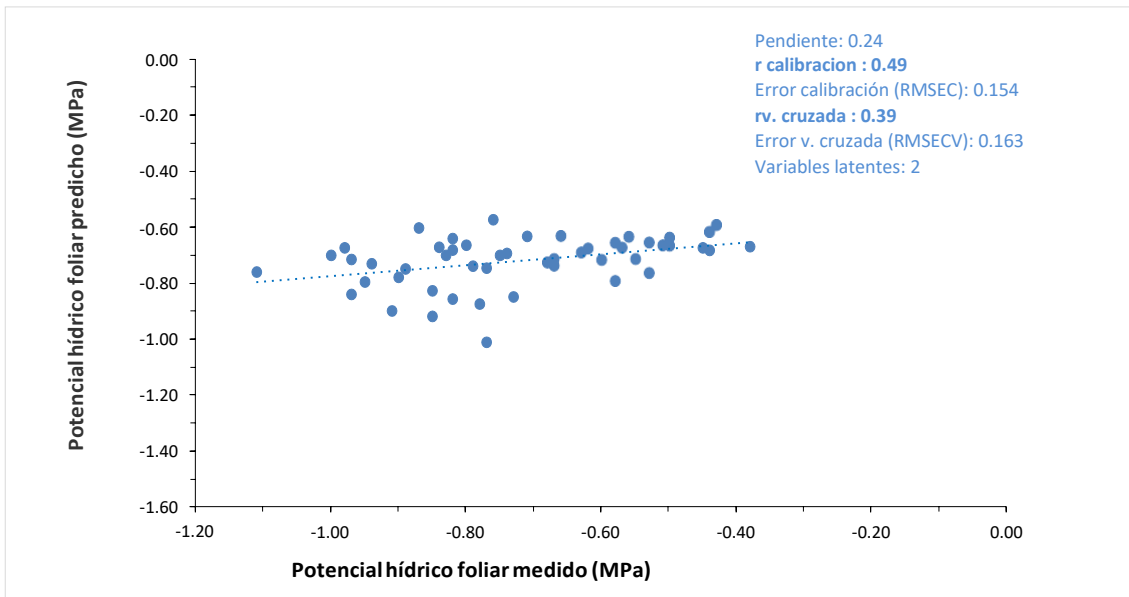


Figura 42. Análisis multivariante de 4 variables (NDVI robot, Tª media vegetación, mediana, desviación), 19 de julio 2108.

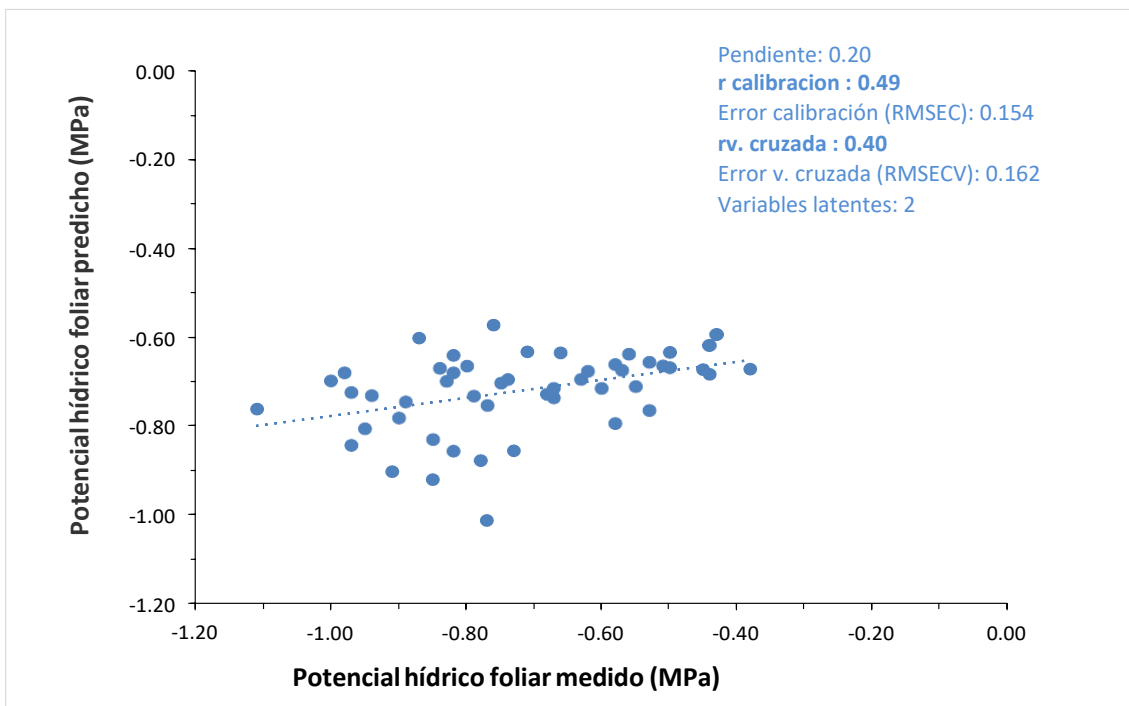


Figura 43. Análisis multivariante de 3 variables (NDVI robot, Tª media vegetación, desviación), 19 de julio 2108.

Con la finalidad de reducir el número de variables, simplificar el modelo y determinar las variables que más influyen en la determinación del potencial hídrico foliar de la planta, un último modelo fue desarrollado con los datos adquiridos por el robot el 19 de Julio por la mañana (10:00 am) (Figura 43)).

Las tres variables que se incluyeron en el modelo fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, desviación estándar de la T^a vegetación.

La figura 43 muestra que los estadísticos matemáticos (rv. cruzada = 0.40, RMSECV = -0.162 MPa y la pendiente = 0.20) obtenidos en el modelo con solamente tres variables fueron muy similares a los anteriores modelos hasta con el doble de variables (6). Además, debemos resaltar que este modelo fue generado con solo dos variables latentes.

Datos días 18 y 19 de julio 2018

A continuación, se muestran los modelos que se obtuvieron combinando los datos de los dos días en los que se llevó a cabo el estudio experimental (18 y 19 de julio).

En este caso se utilizaron ocho variables:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, mediana de la T^a vegetación, desviación estándar de la T^a vegetación, índice térmico CWSI, índice térmico IG, T^a aire, humedad relativa.

En este primer modelo (Figura 44), resultante de la combinación de un mayor número de medidas se consiguió mejorar el coeficiente de validación cruzada alcanzando un valor de 0.43, junto con el error cuadrático medio de validación cruzada que alcanzó los -0.198 MPa tomando únicamente una variable latente.

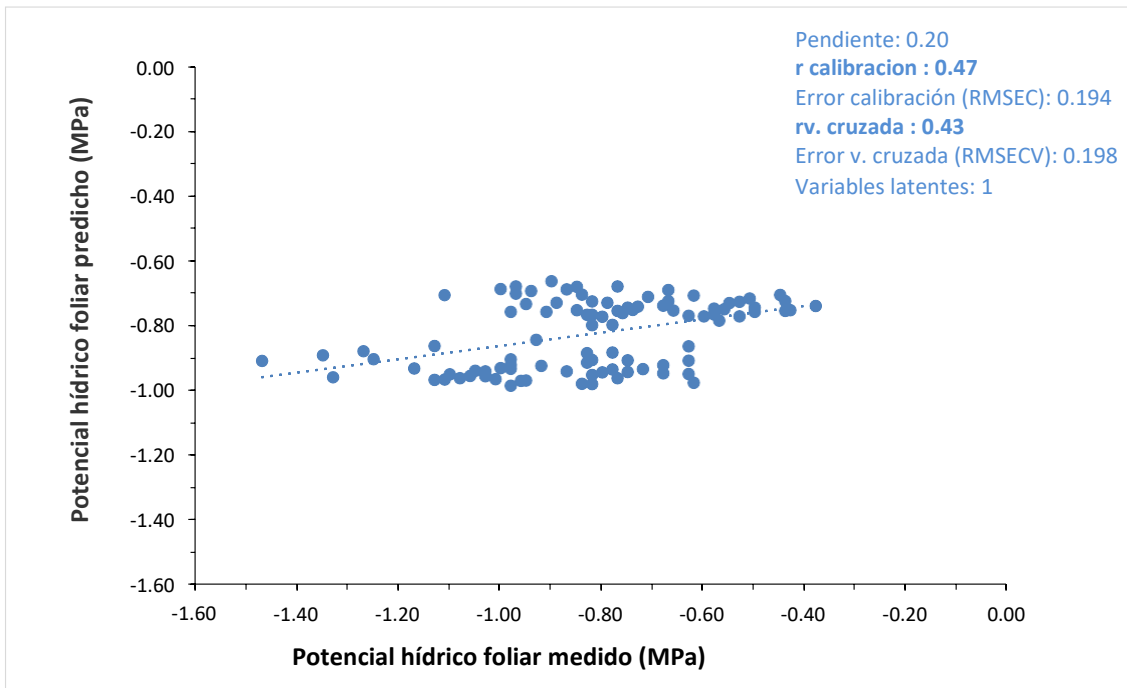


Figura 44. Análisis multivariante de 8 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG, T^a aire, humedad relativa), 18 y 19 de julio.

Con el fin de determinar las variables que más influyen en la predicción del potencial hídrico foliar de la planta de la forma más simplificada posible se desarrolló otro modelo con seis variables (Figura 45). En este modelo se obtuvieron unos estadísticos matemáticos superiores a los obtenidos en el modelo anterior.

Las seis variables que se utilizaron fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, mediana de la T^a vegetación, desviación estándar de la T^a vegetación, índice térmico CWSI, índice térmico IG.

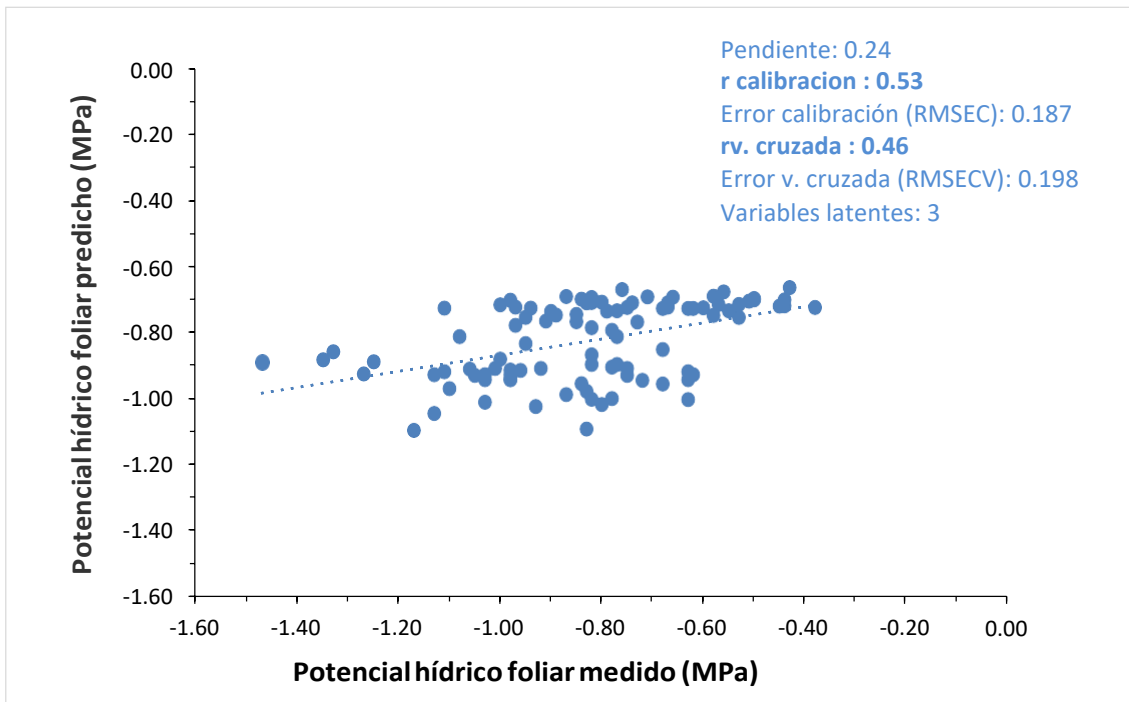


Figura 45. Análisis multivariante de 6 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, mediana, desviación, CWSI, IG), 18 y 19 de julio.

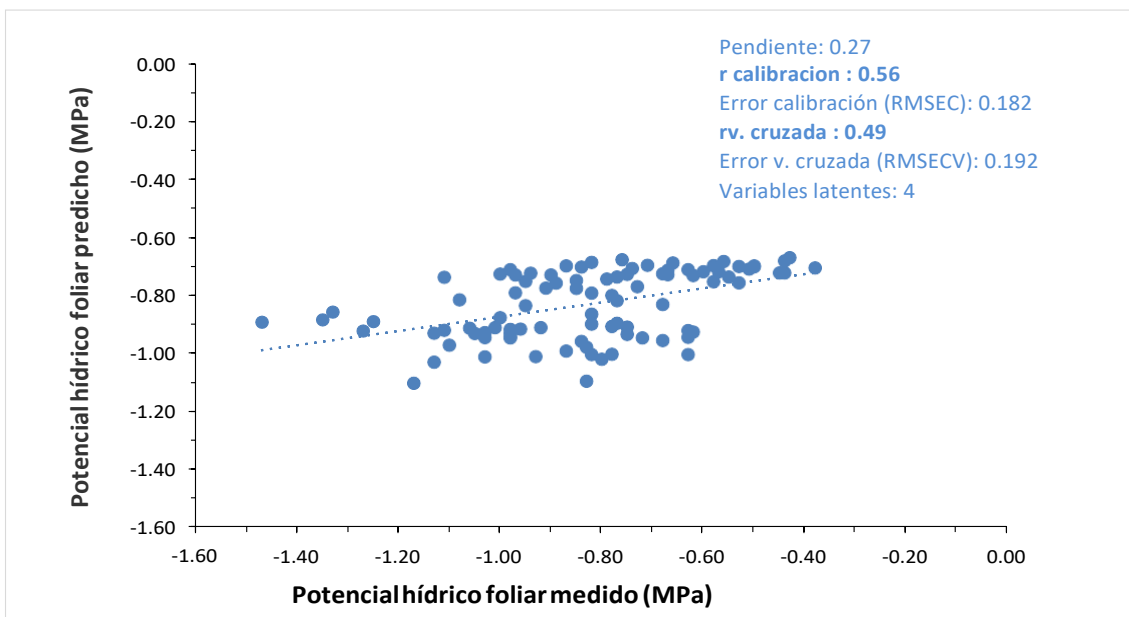


Figura 46. Análisis multivariante de 4 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, mediana, desviación), 18 y 19 de julio.

Con el modelo de cuatro variables (Figura 46), se consigue simplificar en variables manteniendo el mismo rango de datos de potencial hídrico foliar (MPa) que el modelo anterior de mayor número de variables (6). Los estadísticos pendiente y coeficiente de validación cruzada mejoran sus datos alcanzando 0.27 y 0.49 respectivamente.

Las cuatro variables utilizadas fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, mediana de la T^a vegetación, desviación estándar de la T^a vegetación.

Por último, se utilizó la combinación de tres variables. Como se refleja en la figura 47 los estadísticos matemáticos (rv. cruzada, RMSEC y pendiente) mostraron valores similares al anterior modelo.

Las tres variables empleadas en el modelo fueron:

Media de la T^a vegetación, NDVI robot, desviación estándar de la T^a vegetación.

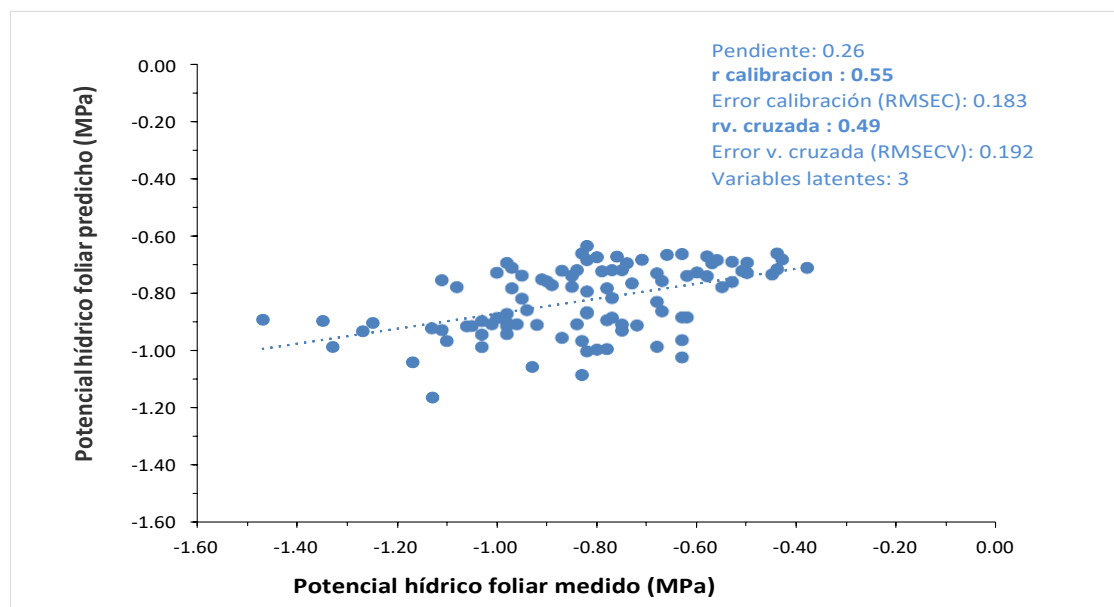


Figura 47. Análisis multivariante de 3 variables (NDVI robot, T^a media vegetación, desviación), 18 y 19 de julio.

A la vista de los resultados obtenidos, el modelo de regresión que presenta los mejores estadísticos fue el generado por la combinación de ambos días y

desarrollado solamente con tres variables. Se trata de un modelo matemático bastante simplificado y con buenas correlaciones para la predicción del potencial hídrico foliar.

Las variables que, en este caso, tuvieron más influencia en la predicción del potencial hídrico foliar fueron los datos recogidos por el robot con la cámara multiespectral (NDVI) y el sensor Apogee (temperatura de la vegetación), los índices térmicos calculados y los datos de humedad relativa y temperatura del aire no siempre significaron una mejora en los valores estadísticos de los modelos.

Respecto a las correlaciones obtenidas para la medida del estado hídrico, estas son inferiores a las de recientes trabajos de otros autores como Gutiérrez *et al.*, (2018) utilizando la misma técnica on-the-go. Esta variación puede deberse, a que en el presente estudio, las medidas se toman automáticamente de un área de vegetación, mientras que en el estudio de Gutiérrez *et al.*, (2018), las medidas se realizan con imágenes térmicas que pudieron ser supervisadas y eliminados los huecos, reduciendo el error producido por la porosidad en la medida.

De los modelos obtenidos, los mejores resultado se obtuvieron cuando se incluyeron las medidas de los dos días. Los valores de r obtenidos (~ 0.50) pueden resultar poco válidos para cuantificar el estado hídrico, pero si permiten realizar una clasificación similar a la descrita por Fernández-Novales *et al.*, (2018).

En el trabajo de Fernández-Novales *et al.*, (2018), se utiliza la técnica de espectroscopía NIR y las medidas también fueron realizadas on-the-go. Se evaluó el estado hídrico y la conductancia estomática permitiendo hacer una clasificación del estrés hídrico en bajo, medio o alto.

Además, los valores de RMSECV obtenidos en los modelos multivariante, son similares a los obtenidos en los citados trabajos (Fernández-Novales *et al.*, 2018) y (Gutiérrez *et al.*, 2018), estando comprendidos en un rango de entre -0.16 y -0.20 (MPa).

4.2 VIGOR DEL VIÑEDO

a) Diagramas boxplot

En los diagramas boxplot para el NDVI medido por el robot (Figuras 48(a) y(b)), se observó cierta asimetría en los valores, más para el día 18 de julio que para el día 19 mostrando algunos datos atípicos. El rango de valores de NDVI aportados por el robot para ambos días fue bastante similar, ya que a esta medida no le influyen las condiciones meteorológicas. Se alcanzó un valor máximo de NDVI de 0.73 y la distribución, una vez unidos los datos de ambos días es más simétrica, estando la media y la mediana (0.66) más próximas.

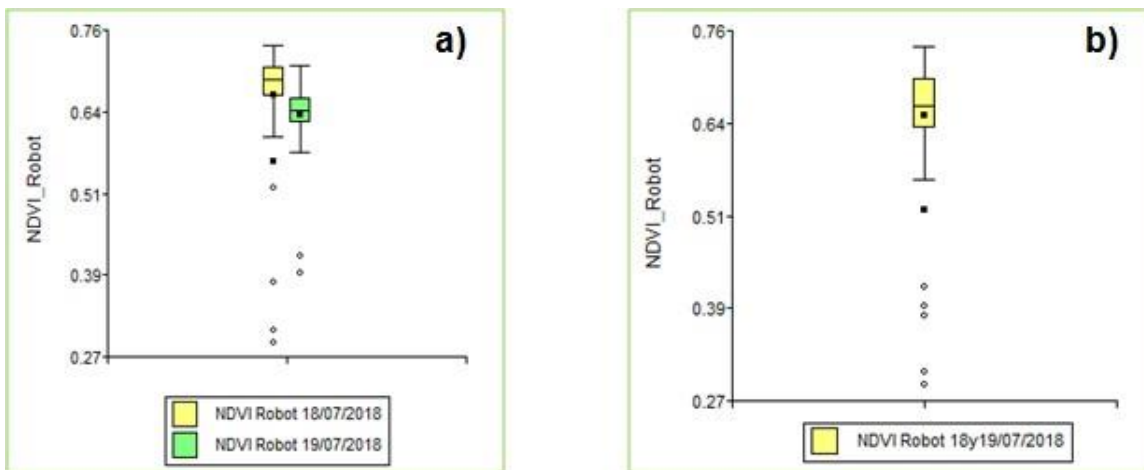


Figura 48. Diagramas boxplot del NDVI robot, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.

La distribución de la muestra de datos para el NDVI tomado de referencia (Figura 49(a) y (b)) es muy semejante a la de los datos del NDVI tomados por el robot, no existen grandes diferencias entre ambos días. Los datos se movieron entre valores máximos de 0.77 para las plantas con mejor estado nutricional y 0.54 para las menos vigorosas.

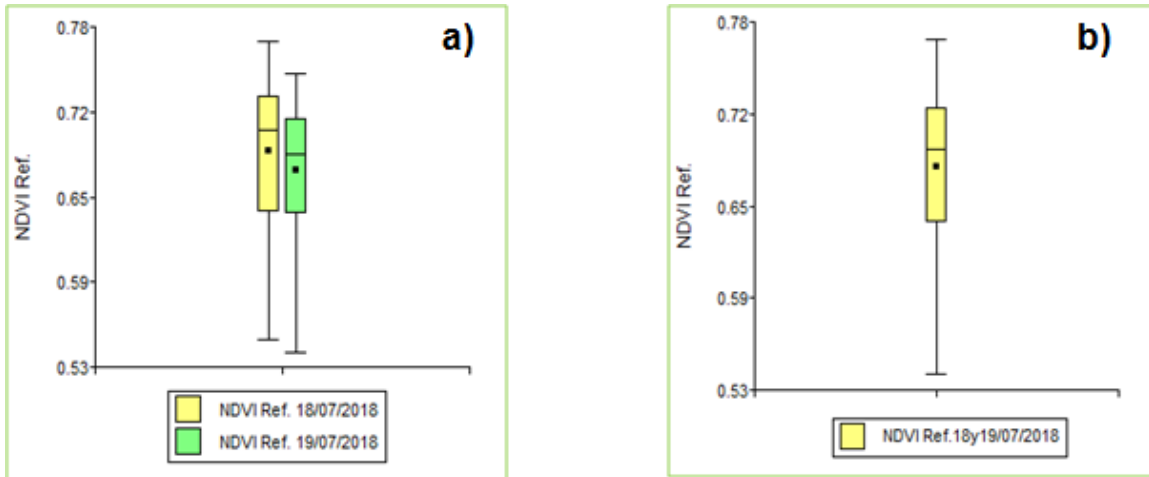


Figura 49. Diagramas boxplot del NDVI de referencia, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.

En el caso de la medida de la fluorescencia de la clorofila (CHL), la distribución de los datos es bastante simétrica como se aprecia en las figuras 50(a) y (b). No se aprecian diferencias notables entre ambos días del estudio como era esperable.

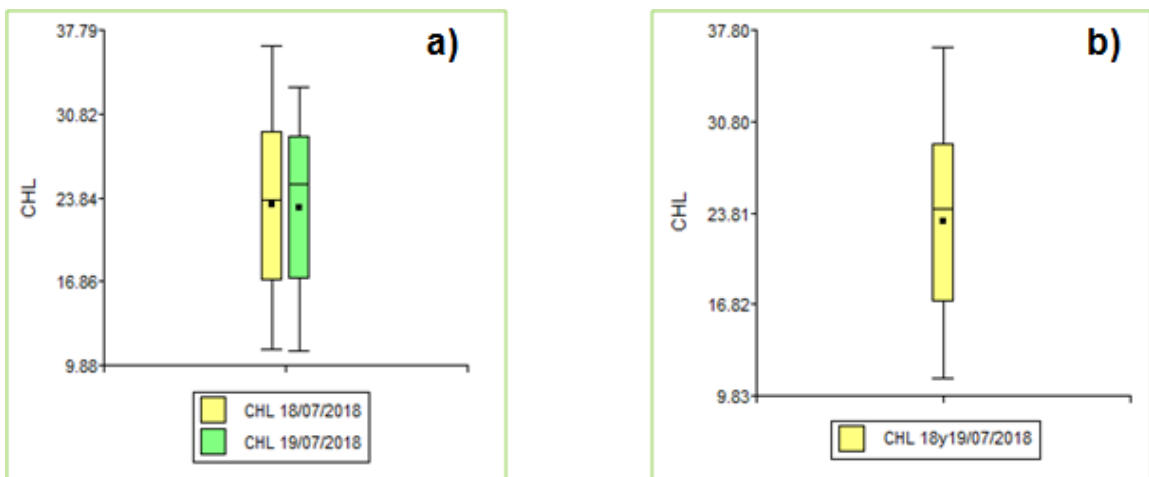


Figura 50. Diagramas boxplot de CHL, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.

Similar distribución que el modelo anterior presentaron los datos de referencia de NBI, una distribución sin grandes diferencias entre ambos días y bastante simétrica (Figura 51(a) y (b)).

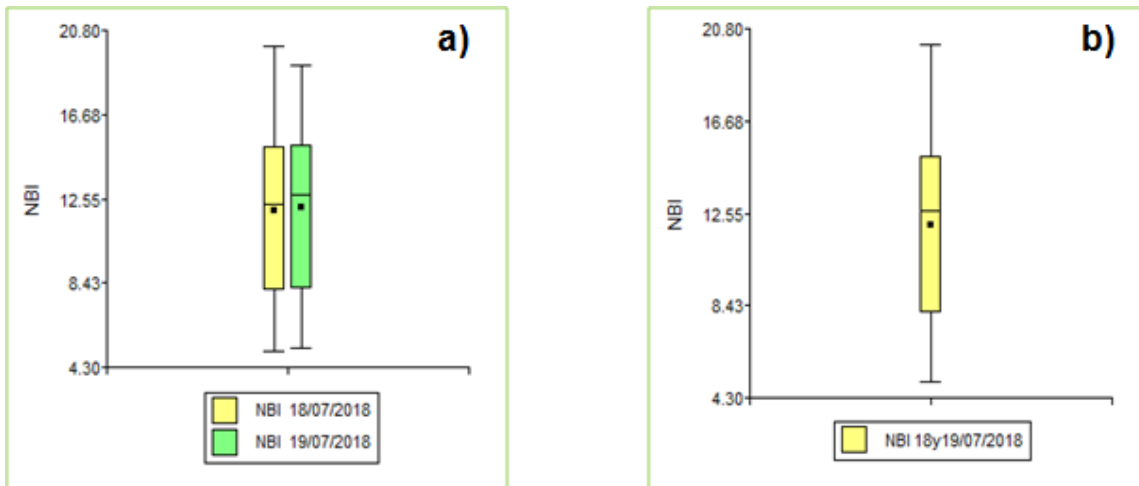


Figura 51. Diagramas boxplot de NBI, (a) separado en ambos días y (b) con los datos en conjunto.

b) Modelos de correlación simple

Para el análisis de resultados del vigor del viñedo, se realizaron varios modelos de regresión en los que se representaron las correlaciones lineales entre la medida del vigor tomada por el robot (NDVI robot) y cada una de las variables de referencia tomadas de manera manual (NDVI, CHL y NBI).

Siguiendo el mismo procedimiento que para el estado hídrico, se desarrollaron los modelos utilizando las variables recogidas de cada día por separado (18 y 19 de julio), y con la combinación de los datos de ambos días.

Datos día 18 de julio 2018

Los resultados de los coeficientes de correlación de Pearson (r) mostrados en la tabla 3 y representados en las figuras 52(a), (b) y (c) para los datos de las medidas del día 18 de julio, muestran unas correlaciones positivas inferiores a 0.5. Las variables que mejores relaciones presentaron fueron el NDVI robot y el NDVI medido de forma manual.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el NDVI robot y las medidas de referencia tomadas para la estimación del vigor el día 18/07/2018

N=50			
NDVI robot	NDVI Referencia	CHL	NBI
	r	r	r
	0.391	0.327	0.319

Datos día 19 de julio 2018

Las correlaciones que se obtuvieron para el día 19 de julio entre el NDVI robot y las variables de referencia siguieron siendo moderadas (Tabla 4), manteniéndose el valor de r en torno a valores de 0.3 para la correlación entre NDVI medido por el robot y el de referencia. Mientras que para las correlaciones con las otras variables (CHL y NBI), el valor de r es inferior al obtenido para el día 18 (Figura 53).

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el NDVI robot y las medidas de referencia tomada para la estimación del vigor el día 19/07/2018.

N=50			
NDVI robot	NDVI Referencia	CHL	NBI
	r	r	r
	0.313	0.208	0.195

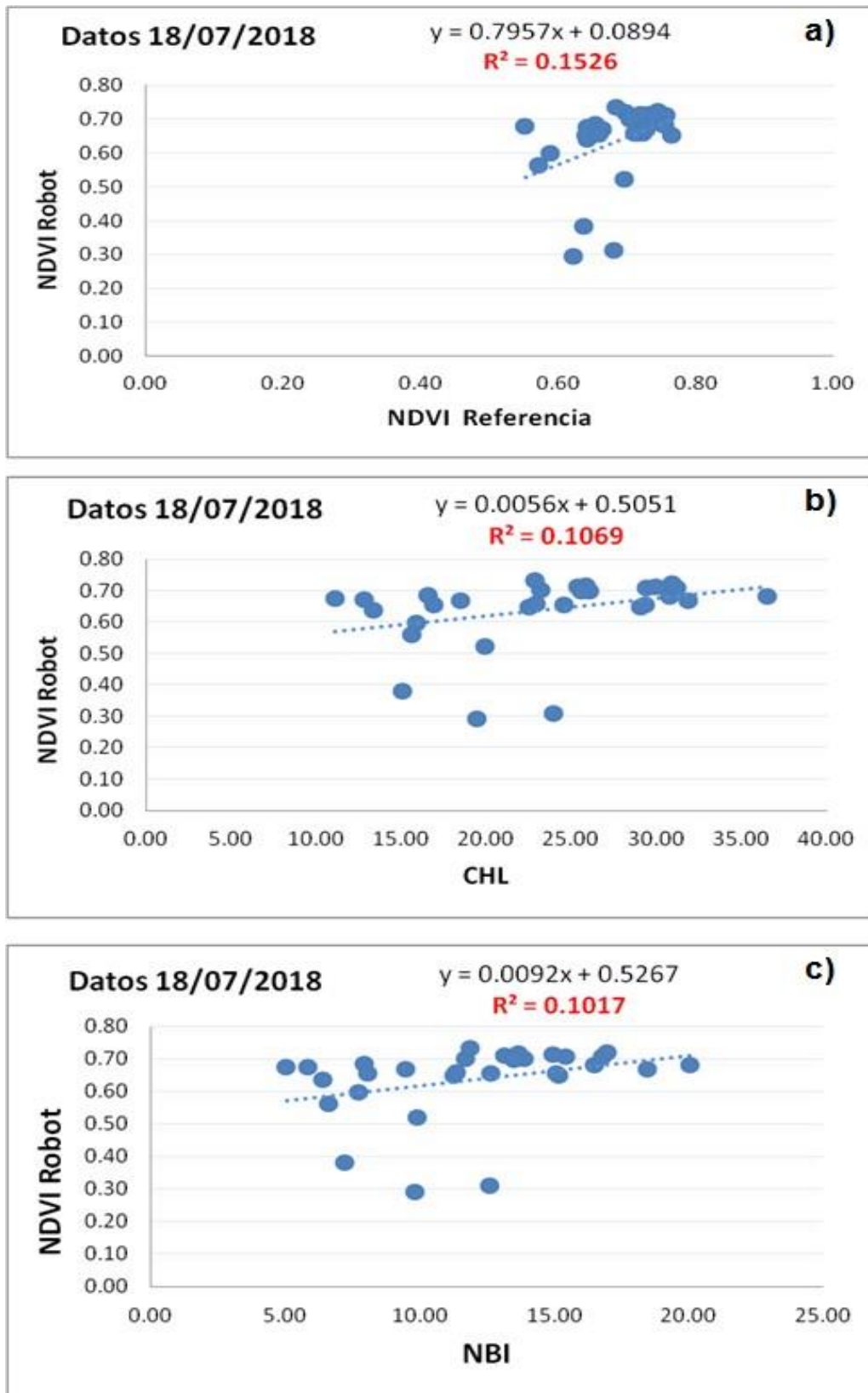


Figura 52. Correlaciones para el día 18/07/18 entre NDVI robot y (a) NDVI referencia, (b) CHL y (c) NBI.

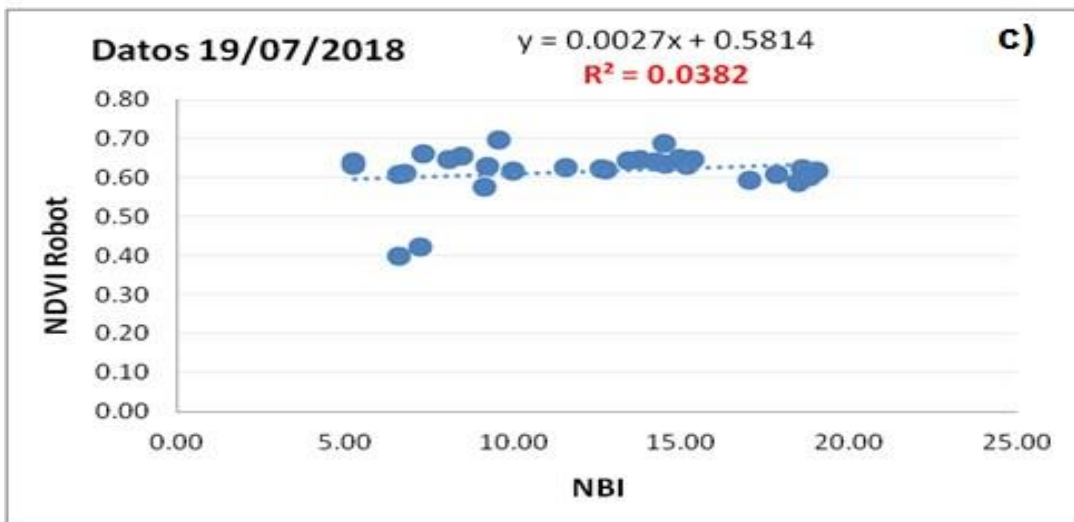
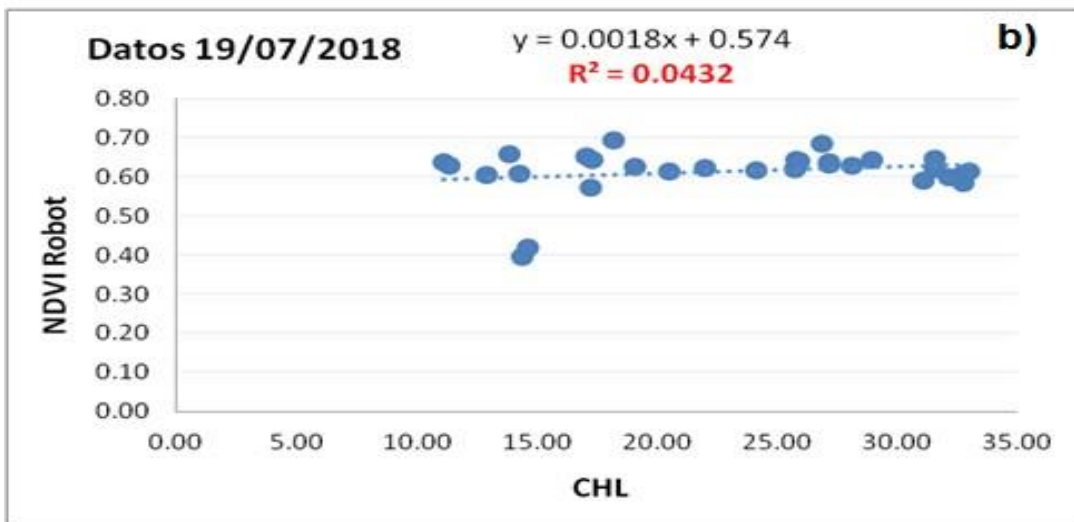
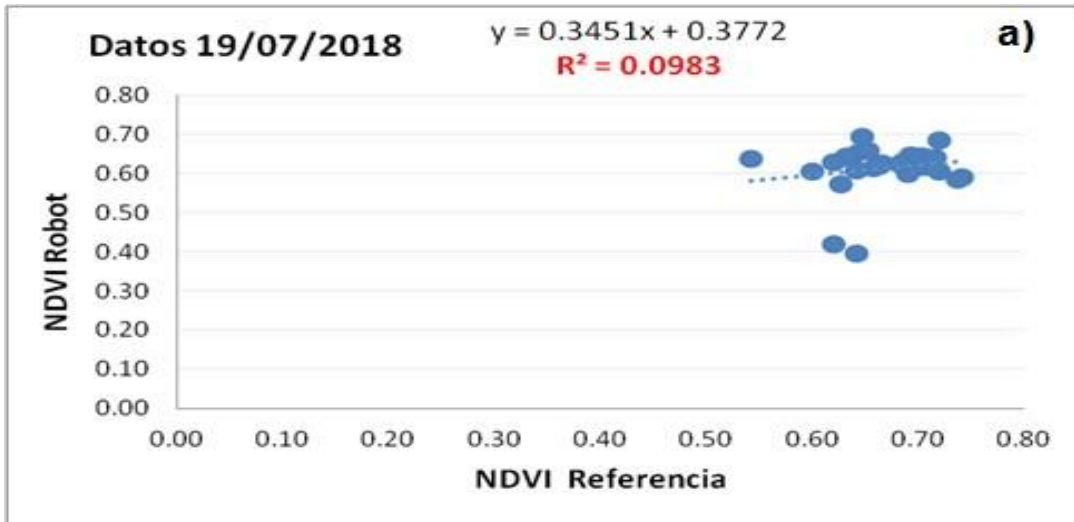


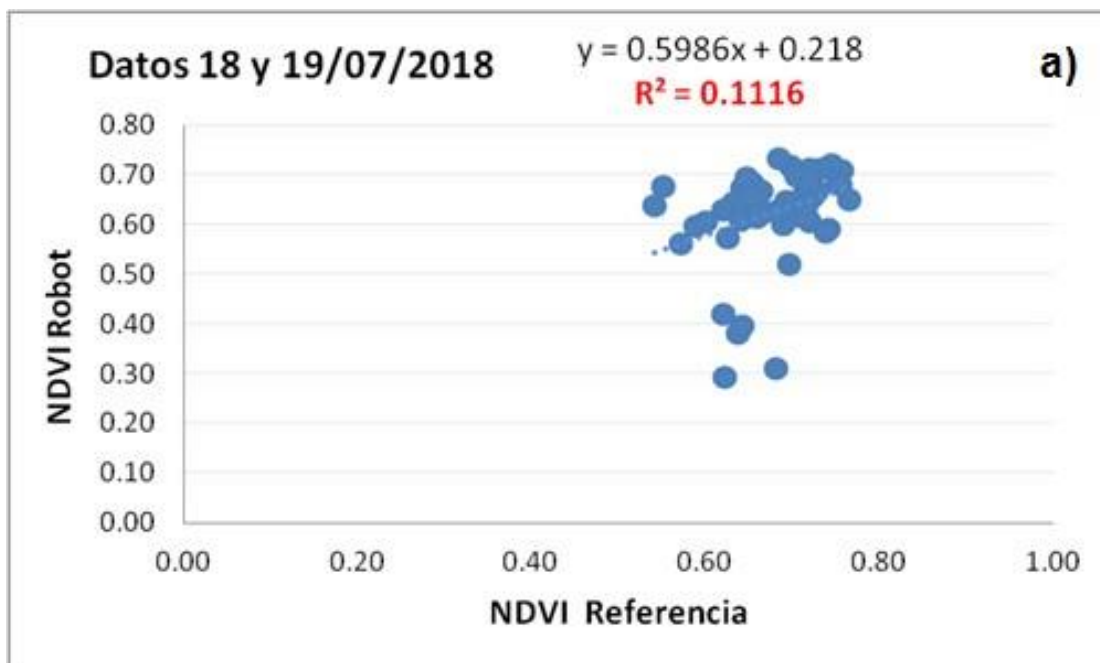
Figura 53. Correlaciones para el día 19/07/18 entre NDVI robot y (a) NDVI referencia, (b) CHL y (c) NBI.

Datos día 18 y 19 de julio 2018

Por último, se estudiaron las correlaciones obtenidas en los modelos que se realizaron con las medidas de ambos días en conjunto (Figuras 54(a), (b) y (c)). Como en los modelos anteriores, el coeficiente de correlación de Pearson (r) está en torno a valores débiles de correlación (Tabla 5). Se mantiene la tendencia de que la mejor relación entre variables se dió entre el NDVI medido por el robot y el NDVI de referencia.

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre el NDVI robot y las medidas de referencia tomada para la estimación del vigor los días 18y19/07/2018.

N=100			
NDVI robot	NDVI Referencia	CHL	NBI
	r	r	r
	0.334	0.267	0.253



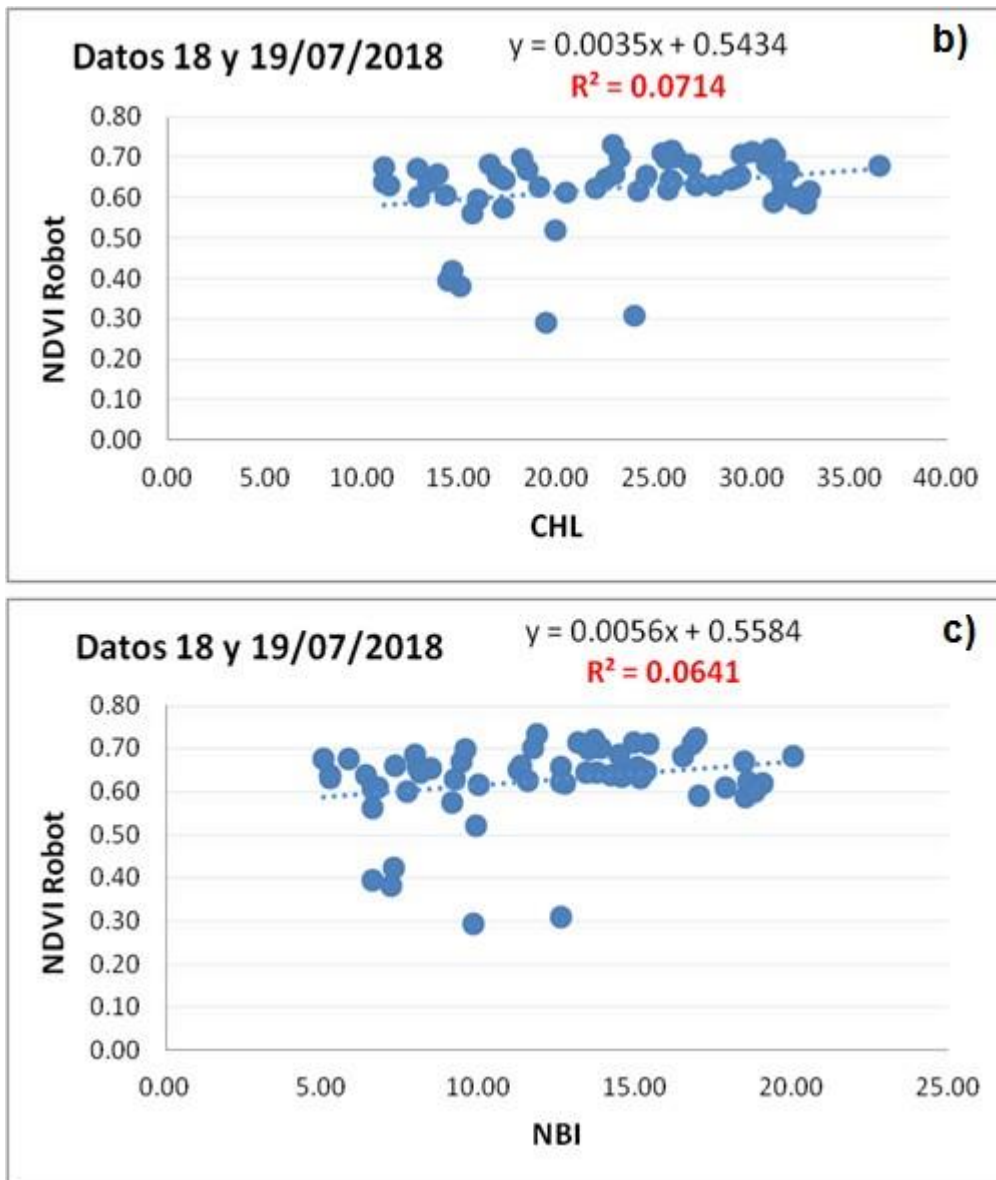


Figura 54. Correlaciones para el día 18y19/07/18 entre NDVI robot y (a) NDVI referencia, (b) CHL y (c) NBI.

Atendiendo a los resultados obtenidos y comprobando que la mejor correlación se produce entre las variables NDVI medido por el robot y NDVI de referencia, se realizaron gráficos de tendencia con la evolución de estos dos valores obtenidos para los diez bloques de las tres filas de estudio para cada día por separado (18 y 19 de julio).

En las figuras 55(a) y (b), se aprecia en general que ambos valores (NDVI robot y NDVI referencia) muestran un comportamiento muy parecido a lo largo de los distintos bloques y que las diferencias observadas son constantes.

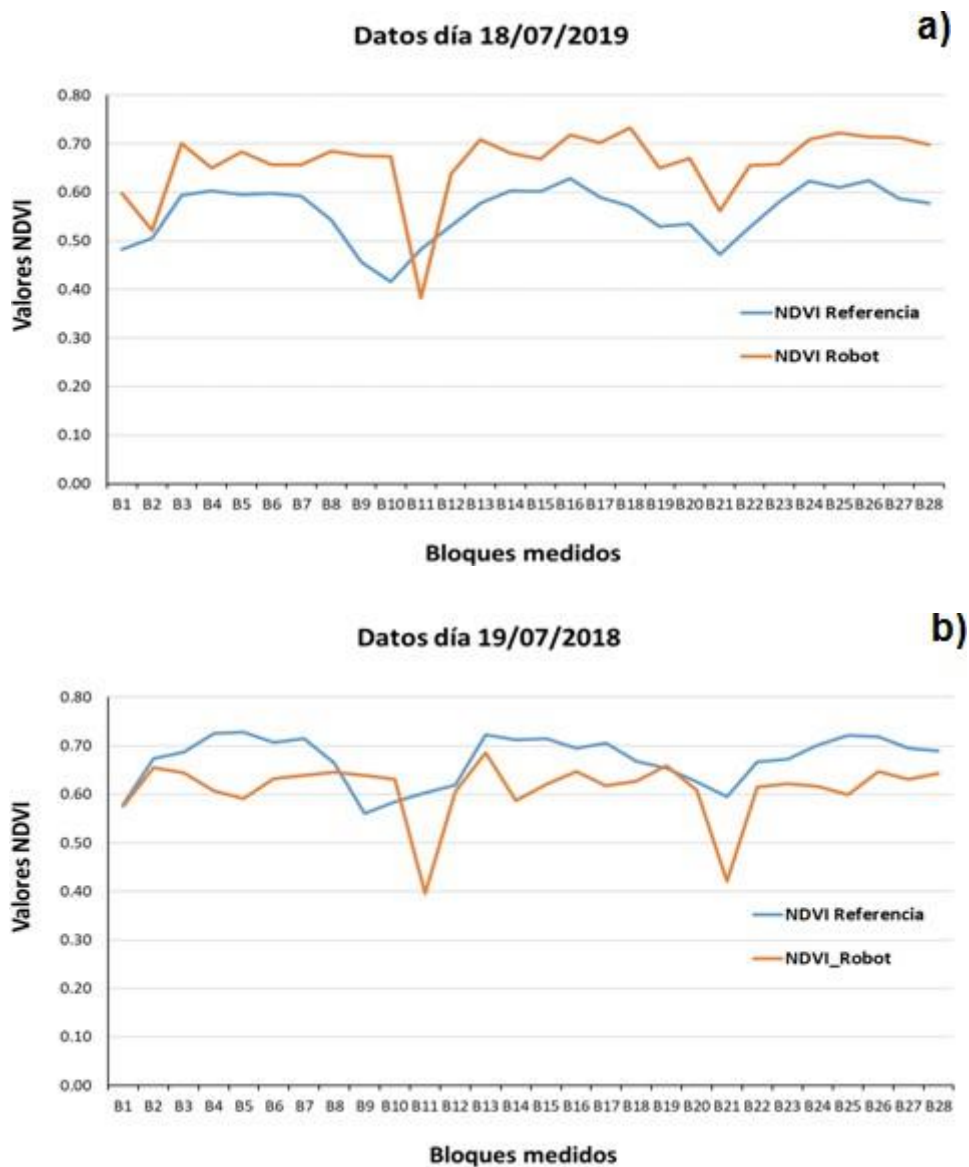


Figura 55. Evolución de las medidas de NDVI recogidas con el robot y el método de referencia (a) el día 18/07/2018 y (b) el día 19/07/18.

Estas diferencias sistemáticas entre ambas medidas de NDVI, pueden ser debidas a que el robot realiza la medición en continuo y se pudo ver influido por la porosidad y el estado de la vegetación. Mientras que la medición del NDVI de referencia se realiza manualmente hoja por hoja y con las medidas tomadas se realiza la media para dar el resultado final.

Otra razón a la que pueden deberse las diferencias es a que la cámara multiespectral utilizada por el robot necesita reajustarse conforme a la

iluminación exterior que recibe y a pesar de que en los días del estudio la nubosidad fue estable en general, esas calibraciones pudieron llevar a obtener las diferencias de medición respecto al método de referencia.

Para ajustar más los valores de NDVI de referencia con los valores de NDVI medidos por el robot, se propone para futuras investigaciones tomar las medidas de referencia con aparatos de medición en continuo.

Otra mejora sustancial para aproximar las medidas de NDVI medido y de referencia sería emplear sensores que eviten tiempos de recalibración. En nuestro caso la cámara multiespectral, al ser un sensor pasivo, necesita recalibrarse cada cierto tiempo para ajustarse a las condiciones de iluminación exterior.

8. CONCLUSIONES

1. El presente estudio demuestra la viabilidad de la instalación de sensores próximos no invasivos en una plataforma terrestre autónoma, para monitorizar el estado hídrico y vigor del viñedo.
2. Se ha establecido una nueva metodología para la evaluación del viñedo con medición en continuo, información de alta resolución y capacidad para monitorizar superficies grandes de terreno de manera rápida y sin supervisión continua.
3. Con el robot (vehículo autónomo dotado de sensores), es posible la adquisición de un gran número de medidas de estado hídrico y vigor de las cepas de manera no destructiva y en un corto espacio de tiempo de manera ágil.
4. Las correlaciones lineales obtenidas entre el potencial hídrico de referencia medido con la cámara de Scholander y la temperatura de la vegetación medida con el sensor radiométrico, así como con los índices térmicos, fueron bastante débiles en ambos días del estudio. También las que se obtuvieron entre las medidas de referencia que evalúan el vigor del viñedo y el NDVI medido por el robot a través de la cámara multispectral.
5. Los modelos multivariantes, en los que se tuvieron en cuenta variables que pueden influir en la medida de la temperatura con el sensor radiométrico en continuo, proporcionaron mejores correlaciones entre el potencial hídrico de referencia y el potencial hídrico predicho. A pesar de que las medidas de temperatura aportadas por el sensor radiométrico son fiables, se necesita más tiempo de investigación para encontrar algoritmos más robustos que mejoren la predicción con el menor número de variables posible.

6. Condiciones como la porosidad de la vegetación pudieron influir tanto a la hora de obtener medidas de la temperatura con el sensor radiométrico como para la toma de imágenes con la cámara multiespectral.

7. A pesar de la diferencia en los valores absolutos de NDVI medidos en continuo con la cámara multiespectral y los proporcionados por el método de referencia, la tendencia de las medidas indican que el uso de una cámara multiespectral para la evaluación del vigor y su clasificación dentro de un viñedo es potencialmente viable.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo-Opazo C, Tisseyre B, Ojeda H, Ortega-Farias S & Guillaume S (2008) Is it possible to assess the spatial variability of vine water status? *OENO One* **42**: 203-219.
- Angella G, Frías C & Salgado R (2016) Conceptos básicos de las relaciones agua-sueloplanta. *INTA Buenos Aires-Argentina*.
- Barco Royo E (2008) Análisis de un sector: el Rioja entre dos siglos. *Logroño, Gobierno de la Rioja*.
- Berni J, Zarco-Tejada P, Sepulcre-Cantó G, Fereres E & Villalobos F (2009) Estimación de conductancia estomática y detección de estrés hídrico en vegetación mediante imágenes térmicas de alta resolución espacial obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). 25-28.
- Calvache Ulloa A (2002) *Manejo del agua: principios fundamentales*.
- Cheein FAA & Carelli R (2013) Agricultural robotics: Unmanned robotic service units in agricultural tasks. *IEEE industrial electronics magazine* **7**: 48-58.
- Chone X, Van Leeuwen C, Dubourdieu D & Gaudillère JP (2001) Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of botany* **87**: 477-483.
- Corell M, Martín-Palomo M, Pérez-López D, Centeno A, Girón I, Moreno F, Torrecillas A & Moriana A (2017) Approach for using trunk growth rate (TGR) in the irrigation scheduling of table olive orchards. *Agricultural Water Management* **192**: 12-20.
- Devaux N, Crestey T, Leroux C & Tisseyre B (2019) Potential of Sentinel-2 satellite images to monitor vine fields grown at a territorial scale. *OENO One* **53**.
- Diago MP, Rey-Carames C, Le Moigne M, Fadaili E, Tardaguila J & Cerovic Z (2016) Calibration of non-invasive fluorescence-based sensors for the manual and on-the-go assessment of grapevine vegetative status in the field. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **22**: 438-449.
- 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-Navales 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.
- dos Santos Costa D, Mesa NFO, Freire MS, Ramos RP & Mederos BJT (2019) Development of predictive models for quality and maturation stage attributes of wine grapes using vis-nir reflectance spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* **150**: 166-178.
- Duckett T, Pearson S, Blackmore S, Grieve B, Chen WH, Cielniak G, ... & Yang GZ. (2018) Agricultural robotics: the future of robotic agriculture. *UK-RAS Network*.
- Fernández J (2014) Plant-based sensing to monitor water stress: Applicability to commercial orchards. *Agricultural water management* **142**: 99-109.
- Fernández-Navales J, Tardaguila J, Gutiérrez S, Marañón M & Diago MP (2018) In field quantification and discrimination of different vineyard water regimes by on-the-go NIR spectroscopy. *Biosystems Engineering* **165**: 47-58.
- Fernández-Navales J, Tardaguila J, Gutiérrez S & Diago MP (2019) On-The-Go VIS+ SW- NIR spectroscopy as a reliable monitoring tool for grape composition within the vineyard. *Molecules* **24**: 2795.
- Ferreira M, Paço T, Silvestre J & Silva R (2008) Evapotranspiration estimates and water stress indicators for irrigation scheduling in woody plants. *Agricultural water management research trends Nova Science Publishers, New York, USA* 129-170.
- Flexas J (2001) Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) as an indicator of leaf photosynthesis and stomatal conductance under drought conditions. *Science Access* **3**.
- Flexas J & Medrano H (2002) Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. *Annals of botany* **89**: 183-189.
- Fuentes S, Tongson EJ, De Bei R, Gonzalez Viejo C, Ristic R, Tyerman S & Wilkinson K (2019) Non-Invasive Tools to Detect Smoke Contamination in Grapevine Canopies, Berries and Wine: A Remote Sensing and Machine Learning Modeling Approach. *Sensors* **19**: 3335.

- García I, Jiménez J, Muriel J, Perea F & Vanderlinden K (2005) Evaluación de sondas de capacitancia para el seguimiento de la humedad de un suelo arcilloso bajo distintas condiciones y tipos de manejo. *Estudios Zona No Saturada Suelo* **7**: 101-107.
- Goldhamer DA & Fereres E (2001) Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science* **20**: 115-125.
- González-Fernández AB, Rodríguez-Pérez JR, Marcelo V & Valenciano JB (2015) Using field spectrometry and a plant probe accessory to determine leaf water content in commercial vineyards. *Agricultural water management* **156**: 43-50.
- González-SanJosé ML, Gómez-Miguel V & Sotés V (2017) La Cultura del Vino, motor del desarrollo sostenible de las regiones vitivinícolas. *In BIO Web of Conferences, EDP Sciences* **9**
- Grant OM (2012) Thermography in viticulture. *Thermology International* **22**: 88-89.
- Grant OM, Ochagavía H, Baluja J, Diago MP & Tardaguila J (2016) Thermal imaging to detect spatial and temporal variation in the water status of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **91**: 43-54.
- Gutierrez S, Diago MP, Fernández-Novales J & Tardaguila J (2018) Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learning. *PloS one* **13**.
- Gutiérrez S (2019) Artificial Intelligence in Digital Agriculture. Towards In-Field Grapevine Monitoring using Non-invasive Sensors. Thesis, Universidad de La Rioja.
- Herath I, Green S, Horne D, Singh R, McLaren S & Clothier B (2013) Water footprinting of agricultural products: evaluation of different protocols using a case study of New Zealand wine. *Journal of cleaner production* **44**: 159-167.
- Idso SB (1982) Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* **27**: 59-70.
- Jones HG (1999) Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and forest meteorology* **95**: 139-149.

- Jones HG (2004) Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of experimental botany* **55**: 2427-2436.
- Jones HG (2013) Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. *Cambridge university press*.
- Kazmierski M, Glémas P, Rousseau J & Tisseyre B (2011) Temporal stability of within-field patterns of NDVI in non irrigated Mediterranean vineyards. *Oeno One* **45**: 61-73.
- Khandelwal SS & Dhiman SD (2014) Reference crop evapotranspiration estimation—a comparative study. *National Conference on Recent Advances in Civil and Structural Engineering* **2**: 87-92.
- Lafi S, Angella GA & Frias C (2011) Retención y flujo de agua en el suelo. Apuntes de Cátedra de Hidrología Agrícola. *Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero*.
- 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**: 499-517.
- Miglietta PP, Morrone D & Lamastra L (2018) Water footprint and economic water productivity of Italian wines with appellation of origin: Managing sustainability through an integrated approach. *Science of The Total Environment* **633**: 1280-1286.
- Millan B, Diago MP, Aquino A, Palacios F & Tardaguila J (2019) Vineyard pruning weight assessment by machine vision: towards an on-the-go measurement system. *OENO One* **53**.
- Moreno J, Alonso L, Delegido J, Rivera J, Ruiz-Verdú A, Sabater N, Tenjo C, Verrelst J, & Vicent J (2014) FLEX (Fluorescence Explorer) mission: Observation fluorescence as a new remote sensing technique to study the global terrestrial vegetation state. *Revista de Teledetección* **41**: 111-119.
- Organisation Internationale de la Vigne et du Vin (2018) Aspectos de la coyuntura mundial.
- Ortuño MF, Conejero W, Moreno F, *et al.* (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**: 1-11.

- Pellegrino A, Gozá E, Lebon E & Wery J (2006) A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy* **25**: 49-59.
- Pereira LS, Allen RG, Smith M & Raes D (2015) Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* **147**: 4-20.
- Pou A, Diago MP, Medrano H, Baluja J & Tardaguila J (2014) Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. *Agricultural Water Management* **134**: 60-72.
- Resco P, Iglesias A, Bardají I & Sotés V (2014) Vulnerabilidad del viñedo ante el Cambio Climático. *Economía del vino en España y el mundo, Cajamar Caja Rural: Almería*, 239-261.
- Rey-Caramés C, Diago MP, Martín MP, Lobo A & Tardaguila J (2015) Using RPAS Multi-Spectral Imagery to Characterise Vigour, Leaf Development, Yield Components and Berry Composition Variability within a Vineyard. *Remote Sensing* **7**: 14458-14481.
- Rodríguez-Pérez JR, Riaño D, Carlisle E, Ustin S & Smart DR (2007) Evaluation of Hyperspectral Reflectance Indexes to Detect Grapevine Water Status in Vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture* **58**: 302.
- 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.
- Saiz-Rubio V, Rovira-Mas F, Diago MP, Fernandez-Novales J, Barrio I, Cuenca A, Alves F, Valente J & Tardaguila J (2019) VineScout: a vineyard autonomous robot for on-the-go assessment of grapevine vigour and water status. *The 12th European Conference on Precision Agriculture*.
- Santesteban LG, Di Gennaro SF, Herrero-Langreo A, Miranda C, Royo JB & 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 LG, Miranda C, Marín D, *et al.* (2019) Discrimination ability of leaf and stem water potential at different times of the day through a meta-analysis in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management* **221**: 202-210.
- Scholasch T (2018) Improving winegrowing with sap flow driven irrigation - a 10-year review. *International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium* 155-168.
- 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**: 822.
- Shamshiri R, Weltzien C, Hameed IA, J Yule I, E Grift T, Balasundram SK, ... & Chowdhary G (2018). Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming.
- Smart R, & Robinson M (1991) Sunlight into wine: a handbook for winegrape canopy management. *Winetitles*.
- Stoll M, Schultz HR & Berkelmann-Loehnertz B (2008) Exploring the sensitivity of thermal imaging for *Plasmopara viticola* pathogen detection in grapevines under different water status. *Functional Plant Biology* **35**: 281-288.
- Tanda G & Chiarabini V (2019) Use of multispectral and thermal imagery in precision viticulture. *Journal of Physics: Conference Series* **1224**: 012034.
- Tardaguila J, Fernández-Novales J, Gutiérrez S & Diago MP (2017) Non-destructive assessment of grapevine water status in the field using a portable NIR spectrophotometer. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **97**: 3772-3780.
- Tremblay N, Wang Z & Cerovic ZG (2012) Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **32**: 451-464.