



Calibración y validación de un modelo matemático de estimación del estado hídrico del viñedo

J.M. MIRÁS-AVALOS¹, J.M. ESCALONA², E.P. PÉREZ-ÁLVAREZ³, P. ROMERO⁴, N. TORRES⁵, L.G. SANTESTEBAN⁵, D. URIARTE⁶, D.S. INTRIGLILO⁷, I. BUESA²

(1) UA-RAMA. Departamento de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medio Ambiente (Unidad asociada a EEAD-CSIC Suelos y Riegos), Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Zaragoza.

(2) Instituto de Investigaciones Agroambientales y de Economía del Agua-Universidad de las Islas Baleares (INAGEA-UIB). Palma, Islas Baleares.

(3) Grupo Viticultura y Enología Aplicadas (VIENAP), Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino (CSIC, Gobierno de La Rioja, Universidad de La Rioja). Logroño.

(4) Grupo de Riego y Fisiología del Estrés. Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental (IMIDA), La Alberca, Murcia.

(5) Departamento de Agronomía, Biotecnología y Tecnología de Alimentos, Universidad Pública de Navarra (UPNA), Pamplona, Navarra.

(6) Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), Guadajira, Badajoz, España.

(7) Departamento de Ecología y Cambio Global, Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE), CSIC-UV-GVA, Moncada, Valencia.

RESUMEN

Las herramientas de apoyo a la toma de decisiones permiten asesorar sobre la optimización del riego o sobre la producción de uva en condiciones de secano, pero se necesitan algoritmos capaces de determinar con fiabilidad el estado hídrico de la vid. Este estudio ha actualizado un modelo de balance hídrico del suelo específico para viñedos, incorporando una ecuación que proporciona datos de potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ'_{tallo}). El modelo se validó en una amplia gama de viñedos españoles con diferentes variedades de vid, suelos, condiciones climáticas, y regímenes hídricos, totalizando 129 escenarios. El modelo reprodujo satisfactoriamente la evolución de Ψ_{tallo} durante la campaña, aunque tendió a sobreestimar ligeramente los valores medidos de Ψ_{tallo} . La diferencia entre valores simulados y medidos fue de 0,024 MPa en promedio. Por tanto, la actualización de este modelo supone una base fiable para una herramienta informática de apoyo a la toma de decisiones para la gestión del agua en viñedos tanto en secano como en regadío.

Palabras clave: Evapotranspiración, Modelización, Potencial hídrico de tallo, Viticultura sostenible.

ABSTRACT

Calibration and validation of a mathematical model for estimating the vineyard water status. Decision support tools can advise on optimizing irrigation or on the feasibility of growing grapes in rainfed conditions, but algorithms capable of reliably determining vine water status are needed. This study has upgraded a soil water balance model specific for vineyards by incorporating an equation that provides midday stem water potential (Ψ_{stem}) data. The model was validated under a wide range of Spanish vineyards involving different grapevine cultivars, soils, climate conditions, and watering regimes, totaling 129 scenarios. The model satisfactorily reproduced the evolution of Ψ_{stem} over the growing season, although it tended to slightly overestimate the measured Ψ_{stem} values. The mean difference between the simulated and measured values was 0.024 MPa. Therefore, this upgraded model constitutes a reliable basis for a computerized decision support tool for water management in vineyards under both rainfed and irrigated conditions.

Key words: Evapotranspiration, Modelling, Stem water potential, Sustainable viticulture.

La gestión eficiente del agua en un viñedo requiere herramientas para determinar el nivel de estrés hídrico. Sin embargo, la medida directa de la disponibilidad de agua en el suelo es compleja debido a la propia heterogeneidad del suelo y la incertidumbre acerca de la profundidad que alcanzan las raíces de la viña. Por su parte, los indicadores basados en medidas realizadas directamente en la planta, como pueden ser la conductancia estomática o el potencial hídrico, son costosos tanto desde el punto de vista económico como en tiempo. A pesar de estos inconvenientes, el potencial hídrico de tallo medido al mediodía solar (Ψ_{tallo}) se utiliza a nivel comercial para la toma de decisiones acerca de la gestión del riego en el viñedo, especialmente para determinar el momento en el que se debe comenzar a regar (OJEDA, 2008).

En la actualidad, se dispone de varias tecnologías con potencial para mejorar la toma de decisiones en viticultura, entre las que destacan la teledetección, el uso de sensores y de registros digitales de las fincas. No obstante, es frecuen-



Vista del viñedo experimental ubicado en Bullas (Región de Murcia).

te que la gestión del riego se base en estimaciones subjetivas, debido a las dificultades para integrar estas tecnologías en herramientas fáciles de usar para la toma de decisiones. En este sentido, los modelos basados en procesos están lo suficientemente avanzados como para apoyar en la toma de decisiones, pero su aplicación práctica se ve limitada por la falta de versiones comerciales. Por consiguiente, se necesitan herramientas simples, a la vez que fiables, para asesorar a los viticultores en su toma de decisiones sobre la gestión hídrica, proporcionando información representativa y fácil de interpretar a los usuarios finales.

En este contexto, el objetivo de este trabajo fue mejorar un modelo previo de balance hídrico del suelo (LEBON y col., 2003) para predecir el Ψ_{tallo} en el viñedo. Además, este trabajo tuvo como segundo objetivo validar el modelo para diferentes variedades de vid cultivadas en España bajo condiciones contrastadas de clima, suelo y de regímenes hídricos, lo que robustece la aproximación realizada. El fin último fue avan-

zar en el conocimiento para obtener una herramienta que permita ser integrada en un programa informático de fácil manejo que apoye en la toma de decisiones para la gestión del agua en el viñedo.

Material y métodos *Breve descripción del modelo*

En este trabajo se ha tomado como base la representación del sistema suelo-planta-atmósfera desarrollada por LEBON y col. (2003) sobre la que se han realizado algunas modificaciones. De manera resumida, el suelo se representa como un reservorio finito, en el que existe una determinada cantidad total de agua transpirable que se estima a partir de propiedades como la textura, la materia orgánica, la pedregosidad y la profundidad, distinguiendo entre suelos calizos y no calizos.

La transpiración de la viña y la evaporación de agua desde el suelo se calculan de manera independiente y el modelo va actualizando diariamente los datos de contenido de agua

PUBLI

Cuadro 1. Características de los viñedos experimentales utilizados para este estudio.

Viñedo	Año de plantación	Varietal	Portainjerto	Sistema de conducción	Marco de plantación (m x m)
Requena	1991	Tempranillo	161-49	Espaldera	2,45 x 2,45
Moncada	2018	Tempranillo	1103 Paulsen	Espaldera	2,5 x 0,8
Yecla	1984	Monastrell	110-R	Vaso	2,70 x 2,70
Jumilla	1994	Monastrell	1103 Paulsen	Espaldera	2,5 x 1,5
Badajoz	2001	Tempranillo	110-R	Espaldera	2,5 x 1,2
Palma	2009	Tempranillo y Garnacha	110-R	Espaldera	2,5 x 1
Olite	2001	Tempranillo	Ruggeri 140	Espaldera	2,5 x 1,1
O Rosal	1996	Albariño	110-R	Espaldera	3 x 2
Leiro	1998	Treixadura	196-17 C	Espaldera	2,4 x 1,25
A Rúa	1997	Godello	110-R	Espaldera	1,95 x 1,35

en el suelo. La transpiración de la viña depende en gran medida de la radiación solar absorbida, que se calcula a partir de las dimensiones del dosel vegetal (RIOU y col., 1989). Bajo condiciones de ausencia de estrés hídrico, la transpiración equivale a la transpiración potencial de la viña, mientras que el efecto del estrés hídrico sobre ella se describe empleando una función bilineal (LEBON y col., 2003), que considera una disminución en la transpiración en función de un umbral de contenido de agua en el suelo, que es un parámetro de entrada del modelo. La evaporación directa de agua desde el suelo se estima según BRISSON y PERRIER (1991), dividiendo este proceso en dos fases tras una secuencia de lluvias o riegos.

Este balance hídrico permite la estimación del potencial hídrico foliar antes de amanecer (Ψ_{aa}) y, como novedad específica de este trabajo, los valores de Ψ_{aa} se pueden transformar en valores de Ψ_{tallo} mediante una relación obtenida experimentalmente a partir de mediciones realizadas en siete variedades de vid ($n = 456$, $R^2 = 0,60$):

$$\Psi_{tallo} = 1,2038 \times \Psi_{aa}^2 + 2,74 \times \Psi_{aa} - 0,2054$$

Datos de entrada

Las variables meteorológicas (radiación solar, evapotranspiración de referencia, etc.) se tomaron de los observatorios meteorológicos más cercanos a los viñedos experimentales. Las propiedades del suelo (textura, profundidad, contenido en materia orgánica) y las característi-

cas de los viñedos (orientación de filas, marco de plantación, dimensiones del dosel) se midieron *in situ*.

Los valores de los parámetros necesarios para ejecutar el modelo, o bien se tomaron de la bibliografía (BRISSON y PERRIER, 1991; LEBON y col., 2003), o se estimaron a partir de datos experimentales. En el caso del umbral de contenido de agua en el suelo a partir del cual la transpiración de la viña se reduce, se ha empleado el valor proporcionado por LEBON y col. (2003), excepto para aquellos viñedos de los que se disponía de medidas de intercambio gaseoso, donde se ha estimado a partir de estos. Por otra parte, las dimensiones del dosel vegetal se determinaron en enero con una cinta métrica en 6 cepas por tratamiento experimental.

Viñedos experimentales

El modelo se validó frente a datos obtenidos en experimentos que comprendían diferentes estrategias de gestión del riego en viñedos de diversas regiones españolas, como se detalla en el Cuadro 1. Bajo condiciones semiáridas, los datos se recogieron durante varios años en viñedos experimentales de Requena y Moncada (Comunidad Valenciana), Yecla y Jumilla (Región de Murcia), Badajoz (Extremadura) y Palma (Islas Baleares). Bajo condiciones más húmedas, debido a la influencia atlántica, los datos se obtuvieron en viñedos de Olite (Comunidad Foral de Navarra), O Rosal, Leiro y A Rúa (Galicia).

Cuadro 2. Indicadores de bondad de ajuste del modelo para algunos de los conjuntos de datos considerados en este trabajo.

Viñedo	Varietal	Año	Tratamiento	R ²	EMA (MPa)
Requena	Tempranillo	2004	Secano	0,96	-0,072
			Riego	0,94	-0,082
			RDS	0,95	-0,036
Yecla	Monastrell	2020	Secano	0,80	-0,155
			Riego	0,67	-0,182
Palma	Garnacha	2022	Riego	0,97	0,055
O Rosal	Albariño	2012	Secano	0,93	-0,273
			Riego	0,88	-0,275
Leiro	Treixadura	2014	Secano	0,98	0,045
			Riego	0,96	-0,019

Abreviaturas: R² = Coeficiente de determinación entre los valores medidos y simulados del potencial hídrico de tallo a mediodía, EMA = Error medio absoluto, RDS = Riego deficitario sostenido al 50% de la evapotranspiración del cultivo.

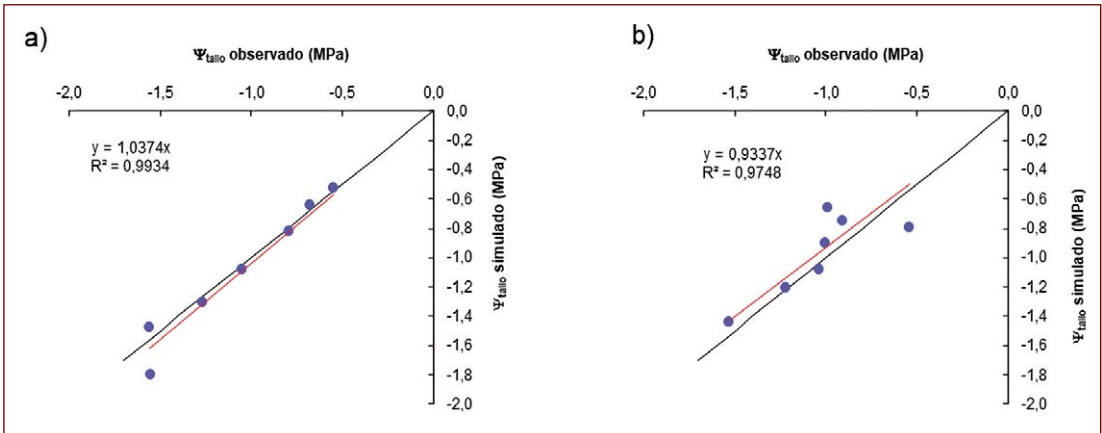


Figura 1. Relaciones entre valores medidos y simulados de potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_{tallo}) para dos escenarios: (a) 'Monastrell' bajo condiciones de secano en Yecla en 2021, y (b) 'Garnacha' bajo condiciones de riego en Palma en 2022. La línea negra representa la recta 1:1.

Dependiendo de la región, la variedad de uva y la gestión del agua fueron diferentes, desde el secano al riego para suplir el 100% de la evapotranspiración del cultivo, pasando por estrategias de riego deficitario y de secado parcial de raíces (INTRIGLIOLO y CASTEL, 2006; ROMERO y col., 2013; CANCELA y col., 2016; URIARTE y col., 2016; HERNÁNDEZ MONTES y col., 2022). El conjunto de datos incluye variedades blancas (Albariño, 'Treixadura' y 'Godello') y tintas ('Tempranillo', 'Garnacha', 'Monastrell' y 'Bobal'). En total, se utilizaron 129 conjuntos de datos para la validación del modelo, abarcando un amplio gra-

diente de condiciones edafoclimáticas, regímenes de riego y variedades de vid.

En todos los experimentos, el Ψ_{tallo} se midió con una cámara de presión en 4–9 cepas representativas de cada tratamiento. En los viñedos experimentales situados en Leiro y Palma además se midió la conductancia estomática y el contenido volumétrico de agua en el suelo.

Evaluación del modelo

Las relaciones entre los valores medidos y simulados de Ψ_{tallo} se evaluaron mediante regresión lineal y coeficientes de determinación (R²).

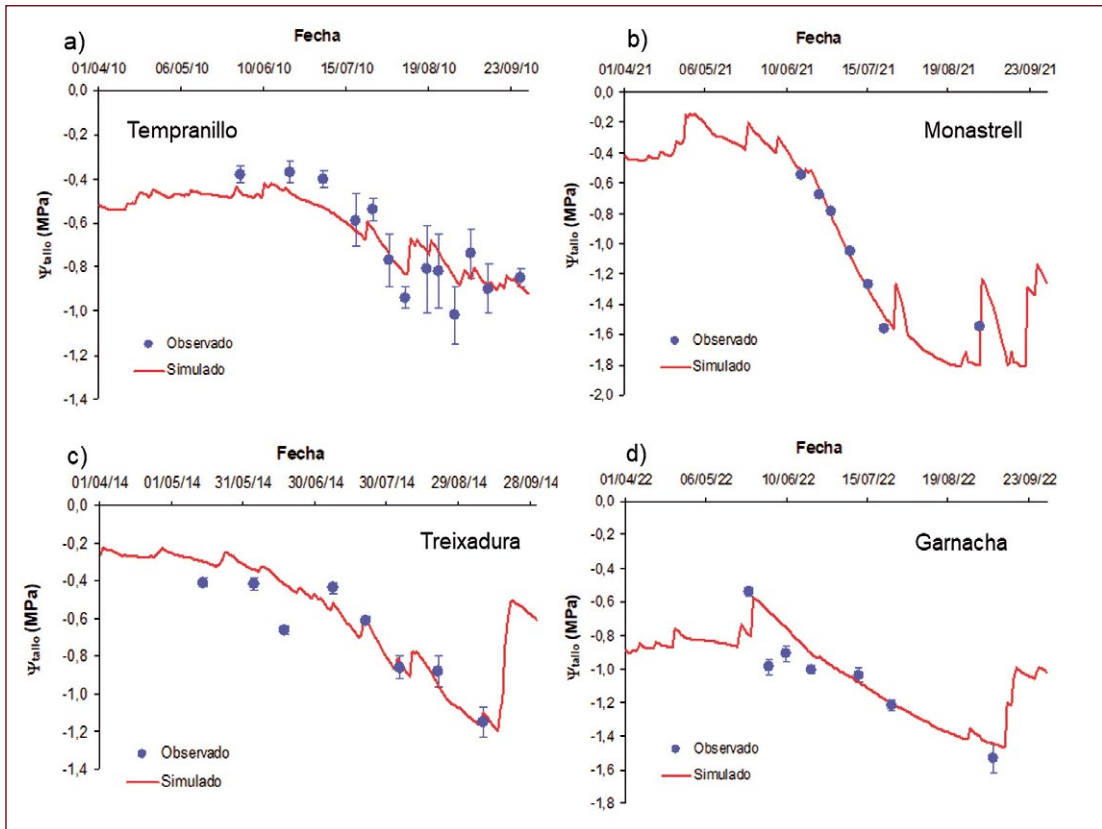


Figura 2. Evolución temporal de los valores observados y simulados de potencial hídrico de tallo a mediodía (Ψ_{tallo}) de algunos de los conjuntos de datos considerados en el presente trabajo: (a) ‘Tempranillo’ en Requena en 2010, (b) ‘Monastrell’ en Yecla en 2021, (c) ‘Treixadura’ en Leiro en 2014, y (d) ‘Garnacha’ en Palma en 2022.

Además, se calculó el error medio absoluto (EMA) para cada serie de datos. Los valores ideales para estos indicadores son 1 para R^2 y 0 para EMA.

Resultados

El modelo ha permitido simular los valores de Ψ_{tallo} de manera satisfactoria para todas las variedades de vid consideradas en este estudio (se muestran algunos ejemplos en el Cuadro 2). En general, el modelo ha tendido a sobreestimar ligeramente (en 76 de los 129 conjuntos de datos) los valores medidos de Ψ_{tallo} , como indican las pendientes de las rectas de regresión entre los valores medidos y simulados de esta variable. No obstante, los R^2 de estas relaciones fueron mayores que 0,90 en 108 ocasiones (se exponen un par de ejemplos en la Figura 1). El EMA varió

entre $-0,54$ y $0,97$ MPa, dependiendo del conjunto de datos considerado. Cuando combinamos los datos de todos los experimentos, el R^2 fue 0,89 y el EMA fue 0,02 MPa.

Los valores simulados de Ψ_{tallo} reprodujeron de manera correcta la dinámica temporal de esta variable para todas las variedades de vid consideradas (Figura 2) y para la mayoría de los escenarios considerados en este estudio, evidenciando que el modelo proporciona salidas robustas y fiables fuera de los conjuntos de datos empleados para construirlo. Los indicadores de bondad de ajuste confirmaron los resultados satisfactorios observados en las gráficas (Cuadro 2). El EMA indicó desviaciones de las salidas del modelo con respecto a los valores medidos de Ψ_{tallo} , aunque la mayoría de estas desviacio-



Vista del viñedo experimental ubicado en Palma (Islas Baleares).

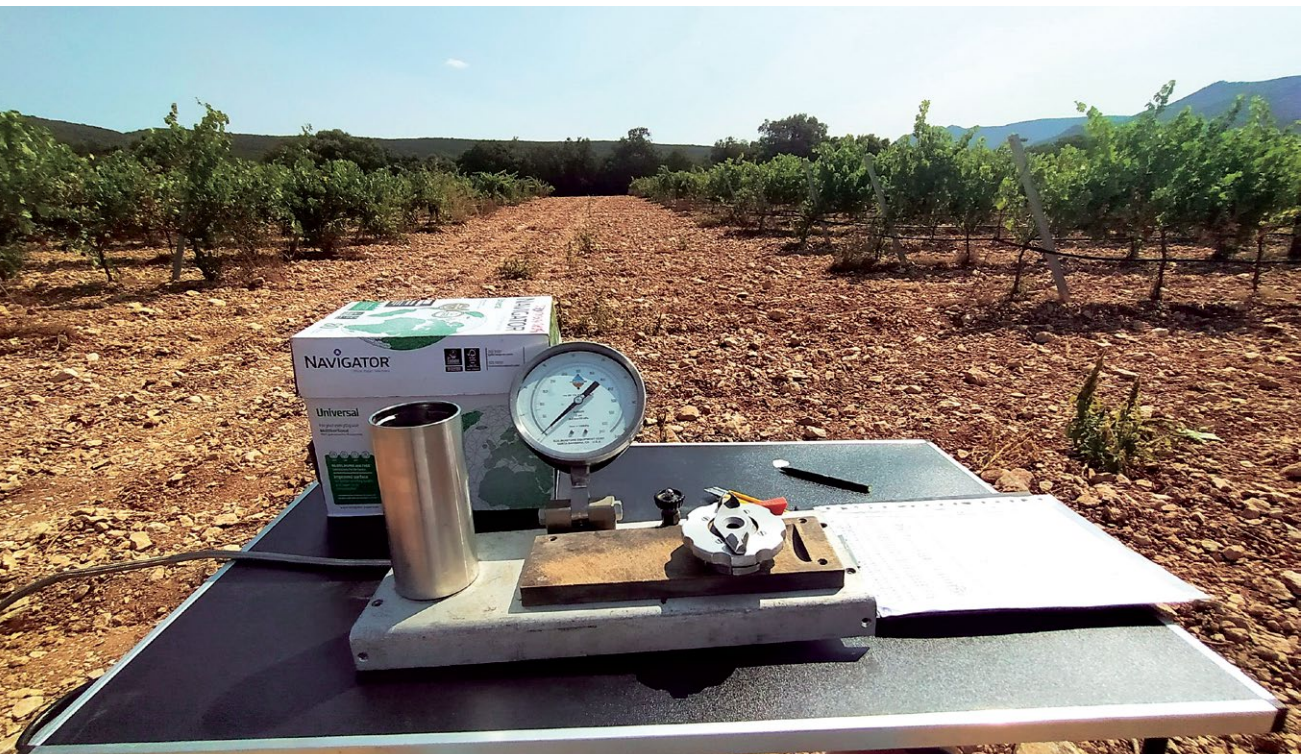
nes fueron débiles y no implicaban un cambio en la clasificación del estado hídrico según el Ψ_{tallo} . No obstante, en el caso de 'Tempranillo' en Requena, se observaron sobreestimaciones al principio de la campaña (Figura 2a). En la parcela de la variedad 'Monastrell' en Yecla (Figura 2b), el modelo reprodujo la tendencia temporal de Ψ_{tallo} de manera prácticamente perfecta. En los casos de 'Trexadura' en Leiro (Figura 2c) y 'Garnacha' en Palma (Figura 2d), se observaron ligeras desviaciones al inicio de la campaña.

En otras ocasiones, el modelo proporcionaba valores más negativos de Ψ_{tallo} que los medidos en el campo (por ejemplo, en el caso de 'Tempranillo' en Badajoz), o no era capaz de reproducir variaciones rápidas de Ψ_{tallo} en ensayos con secado parcial de raíces (por ejemplo, en el caso de 'Monastrell' en Jumilla). Esto sugiere que el modelo no ha sido capaz de capturar algunas situaciones que pueden tener lugar en los viñedos. Por ejemplo, las simulaciones del conjunto de datos del viñedo de 'Tempranillo' ubicado en

Badajoz (URIARTE y col., 2016) proporcionaron valores más negativos de Ψ_{tallo} que los medidos en el campo (entre 11% y 51% más negativos), especialmente hacia la segunda mitad de la campaña. Este viñedo se encontraba en las proximidades de un río, por lo que es probable que los cambios en el nivel de la capa freática hayan compensado la ausencia de precipitación, que es la principal entrada de agua en el modelo. Por el contrario, las simulaciones realizadas con los datos procedentes del viñedo localizado en Moncada, proporcionaron valores menos negativos de Ψ_{tallo} que los medidos en el campo (entre 16% y 42% menos negativos), lo que se puede explicar por el hecho de que se trataba de un viñedo joven y su sistema radicular no estaba totalmente desarrollado para explorar todo el volumen de suelo disponible. Adicionalmente, las prácticas de manejo empleadas en cada viñedo (laboreo, aclareo, cubiertas vegetales, etc.) pueden añadir incertidumbre a las salidas del modelo (LEBON y col., 2003).



Vista del viñedo experimental ubicado en O Rosal (Galicia).



Medidas de potencial hídrico de tallo en el viñedo experimental ubicado en Olite (Comunidad Foral de Navarra).

Por lo tanto, aunque el modelo no consiguió la misma precisión que las medidas directas de Ψ_{tallo} en el campo, sí permitió estimar de manera satisfactoria el estado hídrico de la vid en una amplia gama de situaciones. Por consiguiente, la integración de este algoritmo en un sistema informático de apoyo a la toma de decisiones permitirá obtener resultados fiables del estado hídrico del viñedo, lo que constituye una gran ventaja debido a la sencillez y facilidad de interpretación de los resultados que ofrece. A modo de ejemplo, como el modelo proporciona valores de Ψ_{tallo} de la vid a lo largo de la campaña, la herramienta informática podría relacionarlos con los umbrales descritos por OJEDA (2008) para orientar al usuario final en la programación del riego y así mantener las cepas dentro de los límites de Ψ_{tallo} aconsejados para un determinado tipo de vino, considerando la diferente sensibilidad al déficit hídrico según la fase fenológica del viñedo. Además, el modelo se podría utilizar para estimar la adecuación de ciertas áreas vitivinícolas en régimen de secano para la obtención del estilo de vino deseado.

Consideraciones finales

Este estudio ha permitido confirmar la robustez y la fiabilidad de un modelo desarrollado previamente (LEBON y col., 2003) para simular el balance hídrico en viñedos españoles. Además, el modelo se ha mejorado añadiendo una ecuación empírica para determinar el Ψ_{tallo} de la vid. Por otra parte, el modelo original no proporcionaba una estimación de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, sino que los usuarios debían medir esta variable para, posteriormente, introducirla en el modelo. En esta nueva versión, el almacenamiento de agua en el suelo se estima empleando ecuaciones capaces de diferenciar entre suelos calizos y no calizos. Finalmente, el modelo mejorado se validó con conjuntos de datos independientes de los utilizados para construirlo, permitiendo demostrar el alcance del modelo gracias a la variabilidad de condiciones medioambientales, de gestión y de clima. Estas características, junto con su sencillez y la facilidad de interpretación

de las salidas que ofrece, son muy interesantes para la integración de este algoritmo en una herramienta informática que apoye la toma de decisiones respecto a la gestión del agua en el viñedo. •

Agradecimientos

Esta publicación forma parte del proyecto de I+D PDC2021-121210-C21 y PDC2021-121210-C22 financiado por MICIN/AEI 10.13039/501100011033 y por la Unión Europea Next GenerationEU/ PTR.

Bibliografía

- BRISSEON, N.; PERRIER, A. (1991). A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resour. Res.* Vol. 27(5), pág. 719–727. <https://doi.org/10.1029/91WR00075>
- CANCELA, J.J.; TRIGO-CÓRDOBA, E.; MARTÍNEZ, E.M.; REY, B.J.; BOUZAS-CID, Y.; FANDIÑO, M.; MIRÁS-AVALOS, J.M. (2016). Effects of climate variability on irrigation scheduling in white varieties of *Vitis vinifera* (L.) of NW Spain. *Agric. Water Manage.* Vol. 170, pág. 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.004>
- HERNÁNDEZ-MONTES, E.; ESCALONA, J.M.; TOMÁS, M.; MARTORELL, S.; BOTA, J.; TORTOSA, I.; MEDRANO, H. (2022). Carbon balance in grapevines (*Vitis vinifera* L.): effect of environment, cultivar and phenology on carbon gain, losses and allocation. *Aust. J. Grape Wine Res.* Vol. 28, pág. 534–544. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12557>
- INTRIGLILOLO, D.S.; CASTEL, J.R. (2006). Vine and soil-based measures of water status in a Tempranillo vineyard. *Vitis* Vol. 45(4), pág. 157–163. <https://doi.org/10.5073/vitis.2006.45.157-163>
- LEBON, E.; DUMAS, V.; PIERI, P.; SCHULTZ, H.R. (2003). Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Funct. Plant Biol.* Vol. 30, pág. 699–710. <https://doi.org/10.1071/FP02222>
- OJEDA, H. (2008). L'irrigation de précision en fonction des particularités et les objectifs du vignoble. *Cah. Tech. Rev. Fr. Œnol.* Vol. 229, pág. 1–8.
- RIOU, C.; VALANCOGNE, C.; PIERI, P. (1989). Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne – vérification expérimentale. *Agronomie* Vol. 9, pág. 441–450. <https://doi.org/10.1051/agro:19890502>
- ROMERO, P.; GIL-MUÑOZ, R.; DEL AMOR, F.M.; VALDÉS, E.; FERNÁNDEZ, J.I.; MARTÍNEZ-CUTILLAS, A. (2013). Regulated deficit irrigation based upon optimum water status improves phenolic composition in Monastrell grapes and wines. *Agric. Water Manage.* Vol. 121, pág. 85–101. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.01.007>
- URIARTE, D.; INTRIGLILOLO, D.S.; MANCHA, L.A.; VALDÉS, E.; GAMEIRO, E.; PRIETO, M.H. (2016). Combined effects of irrigation regimes and crop load on 'Tempranillo' grape composition. *Agric. Water Manage.* Vol. 165, pág. 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.11.016>