

# MICROTENSIÓMETROS DE TRONCO

*para determinar el estado  
hídrico de nectarinos*

Maximizar la eficiencia en el uso del agua de riego es siempre un objetivo prioritario de los sistemas agrícolas resilientes. En el área mediterránea, la situación de deterioro y escasez de los recursos hídricos de calidad en la que nos encontramos, unido al hecho del cambio climático, no hacen más que elevar la presión sobre la producción de alimentos. La automatización del fertirriego localizado, la planificación de estrategias de riego deficitario, la incorporación de la nanotecnología, microelectrónica y el IoT, promueven la optimización del riego de precisión. En este sentido, la tecnología para determinar en tiempo real el estado hídrico del cultivo a través de la medida del potencial hídrico de tronco puede contribuir a la mejora en la gestión del riego.

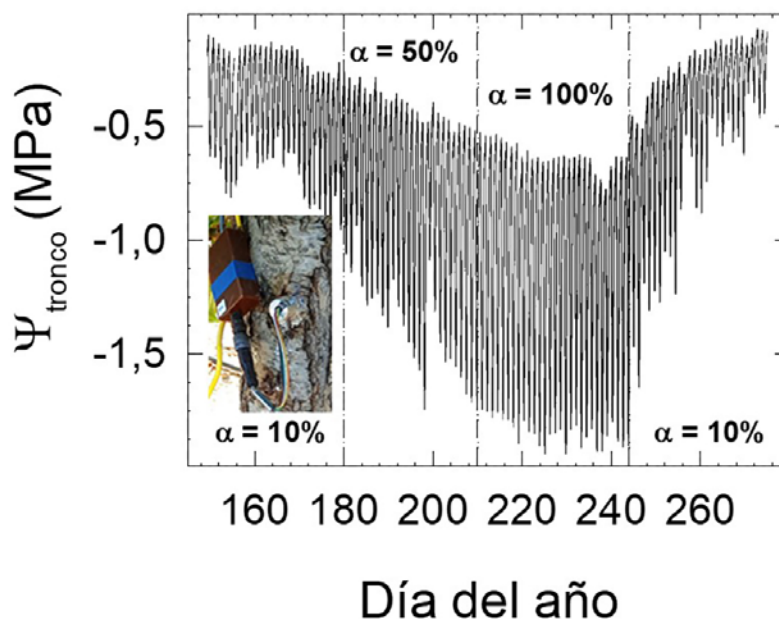
MARÍA R. CONESA, JUAN VERA, WENCESLAO CONEJERO\*, M<sup>a</sup> CARMEN RUIZ-SÁNCHEZ  
Departamento de Riego, CEBAS-CSIC. Murcia  
\* [wenceslao@cebas.csic.es](mailto:wenceslao@cebas.csic.es)



La mayor parte de las explotaciones frutales dispone de un programador en el que semanalmente se fija el día y la duración del riego, generalmente, en base a cálculos empíricos de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ , Allen *et al.*, 1998). La consideración de estrategias de Riego Deficitario Controlado, RDC (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010) junto a la información proporcionada por sensores que monitorizan el contenido del agua en el suelo (Vera *et al.*, 2019) han permitido la creación de protocolos de riego eficientes y autónomos en nectarino sin repercutir en la producción ni en la calidad de la cosecha, suponiendo un ahorro del 40% de agua de riego y un aumento en la eficiencia del uso del agua del 34%, comparado con la programación tradicional basada en la  $ET_c$  (Conesa *et al.*, 2021).

El desarrollo tecnológico actual permite concebir el término emergente de biosensor, que monitoriza información relativa a indicadores del estado hídrico de las plantas. Entre ellos destacan los sensores de flujo de savia, dendrómetros (para medir las fluctuaciones del diámetro del tronco) y termo-radiómetros (para medir la temperatura de la copa de los árboles). El reciente desarrollo de los microtensiómetros (MTs) para la medida en tiempo real del potencial hídrico de tronco ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) se postula como alternativa a la medida discreta del potencial hídrico de tallo ( $\Psi_{\text{tallo}}$ ), indicador tradicional y estándar del estado hídrico de las plantas, obtenida con cámara de presión (Shackel *et al.*, 1997). Sin embargo, hasta la fecha, pocos estudios han evaluado la idoneidad de los MTs en condiciones de campo (Blanco y Kalcsits, 2021; Pagay, 2022).

Con estas premisas se planteó un protocolo automático de riego basado en el contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta_v$ ), criterios de RDC y el uso de MTs, para evaluar la idoneidad de estos sensores sobre el comportamiento fisiológico de nectarinos en diversos escenarios de



**FIGURA 1**  
Detalle de un microtensiómetro (MT) instalado en uno de los troncos de nectarino, y evolución quinceminutaria del potencial hídrico de tronco ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) durante la fase de postcosecha del cultivo.

## La medida combinada del estado hídrico del suelo y la planta permite el estudio minucioso de la dinámica del continuo suelo-planta-atmósfera

disponibilidad hídrica en el marco del continuo suelo-planta-atmósfera. Si consideramos que España lidera la producción comercial de melocotón y nectarina en la cuenca mediterránea (seguida de Italia), con una media de

1,42 Mt año<sup>-1</sup> en el periodo 2011-2021 (FAOSTAST, 2022), y que la Región de Murcia es la tercera comunidad autónoma del país con mayor superficie cultivada (en torno a 14.000 ha), suponiendo el 66% del total de producción de especies leñosas no cítricas en la Región de Murcia, estos resultados son de suma importancia.

### Condiciones experimentales

El estudio se realizó en una parcela de nectarinos extratempranos adultos (*Prunus persica* (L.) Batsch, cv. Flariba) injertados sobre GxN-15 (recolección: primera semana de mayo), en la Estación Experimental del CEBAS-CSIC (Santomera, Murcia), durante el verano de 2022 (fase de postcosecha) y bajo la influencia de las condiciones semiáridas típicas de esta región mediterránea. Los árboles se disponían a razón de 6,5 m x 3,5 m, con dosel vegetal en forma de vaso abierto. El suelo en sus primeros 100 cm de profundidad era pedregoso, de textura franco-arcillosa y bajo contenido en materia orgánica (1,3%). El contenido de agua del suelo

( $\theta_v$ ) a capacidad de campo (CC) y en el punto de marchitez permanente (PM) era de 0,29 y 0,14  $m^3 m^{-3}$ , respectivamente. El sistema de riego por goteo contaba con una línea de goteros por hilera de árboles con 4 emisores autocompensantes (4 L  $h^{-1}$ ) por árbol ubicados a 0,5 y 1,3 m del tronco.

A las aplicaciones estacionales de fertilizantes se sumaron los aportes orgánicos procedentes de los restos de poda de los mismos árboles, bajo un régimen de no laboreo.

En la parcela de estudio se seleccionaron cuatro árboles al azar, en los que se emplazaron sondas capacitivas EnviroScan® (Sentek Sensor Technologies, Sidney, Australia) para conocer el  $\theta_v$  en el entorno de máxima absorción radicular (hasta 50 cm de profundidad, Abrisqueta *et al.*, 2017); y microtensiómetros (MTs, FloraPulse, Davis, CA, EE. UU.) para medir el  $\Psi_{tronco}$  (Figura 1). Se disponía de infor-

mación agrometeorológica procente de una estación automática ubicada en la misma Estación Experimental. Un sistema de radiotransmisión conectado a un servidor en la nube (addVANTAGE, ADCON Telemetry, Viena, Austria) permitió la adquisición, procesamiento y visualización de los datos agrometeorológicos,  $\theta_v$ ,  $\Psi_{tronco}$  y de los volúmenes de agua de riego aplicados, cada 15 minutos. La programación automatizada del riego consistió en un protocolo en el que el riego se activaba cuando el  $\theta_v$  alcanzaba un umbral predeterminado en el perfil de raíces activo (0-50 cm de profundidad) y se desactivaba cuando el suelo recuperaba el valor de CC. Los umbrales de  $\theta_v$  se adaptan de la ecuación correspondiente al nivel de agotamiento máximo permisible (AMP) del suelo según Merriam (1966):

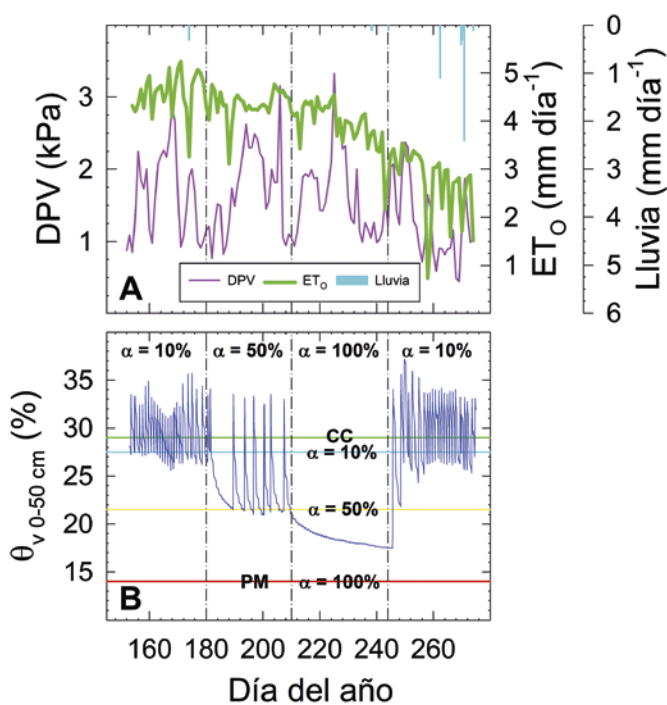
$$AMP = CC - \alpha \cdot (CC - PMP)/100$$

donde CC y PMP se expresan en tanto por ciento y  $\alpha$  es el porcentaje de agotamiento del agua disponible en el suelo.

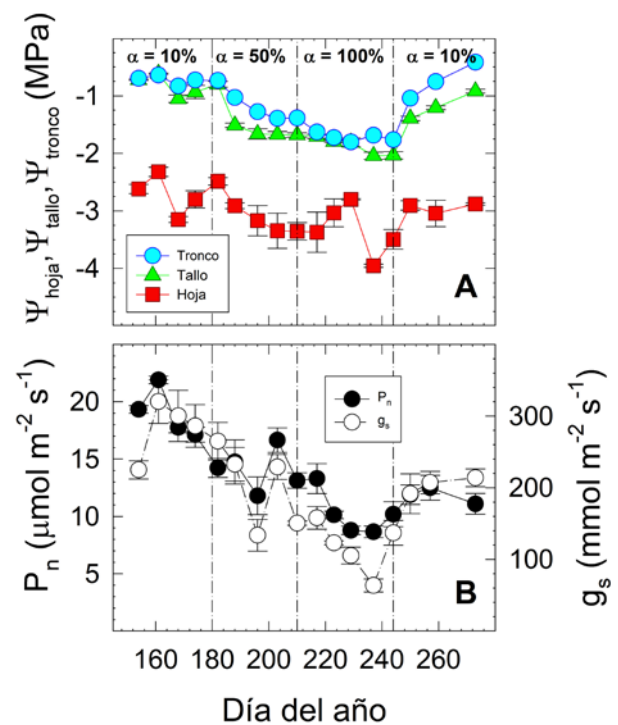
Se establecieron tres escenarios hídricos con un aumento progresivo de  $\alpha$  a fin de establecer distintos grados de déficit hídrico, seguidos de una recuperación del riego:

- $\alpha = 10\%$ , bien regado (del 3 al 29 de junio).
- $\alpha = 50\%$ , déficit hídrico moderado (del 30 de junio al 29 de julio).
- $\alpha = 100\%$ , déficit hídrico severo (del 30 de julio al 1 de septiembre).
- Recuperación del riego,  $\alpha = 10\%$ , bien regado (del 2 al 30 de septiembre).

Durante el ensayo, además, se tomaron medidas discretas con cámara de presión (frecuencia semanal) del potencial hídrico de tallo ( $\Psi_{tallo}$ ) en hojas sombreadas y cubiertas según



**FIGURA 2**  
(A) Evolución estacional del déficit de presión de vapor al mediodía (DPV), de la evapotranspiración diaria de referencia (ET<sub>0</sub>) y episodios de lluvia diarios; (B) contenido volumétrico de agua en suelo ( $\theta_v$ ) correspondiente al perfil de máxima absorción radicular (0-50 cm de profundidad).



**FIGURA 3**  
Valores estacionales discretos de: (A) potencial hídrico de tallo ( $\Psi_{tallo}$ ), foliar ( $\Psi_{hoja}$ ) y de tronco ( $\Psi_{tronco}$ ), tomados al mediodía solar; (B) fotosíntesis neta ( $P_n$ ) y conductancia estomática ( $g_s$ ) a las 10:00 a.m. (UTC+2).





las recomendaciones de Hsiao (1990) y foliar ( $\Psi_{\text{hoja}}$ ) en hojas descubiertas y soleadas, ambas al mediodía solar; e intercambio gaseoso: fotosíntesis neta ( $P_n$ ) y conductancia estomática ( $g_s$ ), con medidor portátil LI-6400 en las condiciones ambientales que propician una máxima tasa fotosintética diaria ( $\text{PAR} \approx 1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2 = 400 \text{ ppm}$  y temperatura del aire =  $25\text{-}30^\circ\text{C}$ ), lo que sucede en torno a las 10:00 a.m. (UTC+2). Adicionalmente, se realizó un análisis de *sensibilidad* (S), como la *relación intensidad de señal / ruido* (Goldhamer y Fereres, 2001) de los indicadores del estado hídrico de la planta para evaluar su idoneidad, cuantificando la situación de estrés hídrico. La intensidad de la señal (IS) se obtuvo del cociente de los datos

obtenidos en condiciones de déficit hídrico severo ( $\alpha = 100\%$ ) respecto de aquellos del periodo bien regado ( $\alpha = 10\%$ ), mientras que el ruido se estimó a partir del cálculo del coeficiente de variación de los datos (CV).

### Resultados

Las condiciones de elevada demanda hídrica ambiental y escasez de precipitaciones durante el verano, favorecieron una rápida respuesta de los valores de  $\theta_v$  a los sucesivos umbrales de programación del riego. El nivel de agotamiento de la humedad del suelo ajustó automáticamente la frecuencia de riego (**Figura 2**). Así, durante el primer periodo de adecuado suministro hídrico ( $\alpha = 10\%$ ; AMP = 27,5%) la frecuencia de riego fue diaria. En el segundo periodo,

correspondiente a un déficit hídrico moderado ( $\alpha = 50\%$ ; AMP = 21,5%), la frecuencia de riego fue de 2-3 días. Por su parte, durante el periodo  $\alpha = 100\%$ , correspondiente a un déficit hídrico severo de supresión del riego, el valor mínimo alcanzado de  $\theta_v$  fue del 17% (ligeramente superior al PMP). Posteriormente, cuando el riego fue restablecido ( $\alpha = 10\%$ ), se recuperó la frecuencia de riego diaria con una mayor variabilidad en torno a CC, debido a los eventos de lluvia en ese periodo.

El estado hídrico de los nectarinos respondió claramente a las condiciones de riego impuestas (**Figura 3A**). Al inicio del ensayo ( $\alpha = 10\%$ ), se obtuvieron valores de  $\Psi_{\text{tallo}} \approx -0,8 \text{ MPa}$  y  $\Psi_{\text{hoja}} \approx -1,20 \text{ MPa}$ , dentro de lo esperado en esta variedad, de acuerdo a experiencias propias previas con un adecuado suministro hídrico (Abrisqueta *et al.*, 2015), mientras que el valor medio de  $\Psi_{\text{tronco}}$  fue de  $-0,7 \text{ MPa}$ . Asimismo, al final de la fase de déficit hídrico severo ( $\alpha = 100\%$ ) se alcanzaron valores mínimos de  $\Psi_{\text{tallo}} = -2,0 \text{ MPa}$ ,  $\Psi_{\text{hoja}} = -3,5 \text{ MPa}$  y  $\Psi_{\text{tronco}} = -1,8 \text{ MPa}$ . Para todos los periodos

Los microtensiómetros de tronco son una herramienta útil para la monitorización del estado hídrico de la planta en tiempo real

de riego programados se cumplió el siguiente gradiente con los valores de  $\Psi_{\text{tronco}} \geq \Psi_{\text{tallo}} \geq \Psi_{\text{hoja}}$ , aumentando la influencia de las condiciones atmosféricas y la resistencia al flujo de agua a lo largo del continuo de potenciales hídricos.

La medida simultánea de  $P_n$  y  $g_s$  indicó la condición de riego impuesta en base a AMP, con valores máximos y mínimos en las fases de adecuado suministro hídrico y riego deficitario o nulo, respectivamente (Figura 3B). Durante el curso diario,  $P_n$  y  $g_s$  aumentaron desde el amanecer hasta el momento de máxima tasa fotosintética en todas las condiciones de riego estudiadas ( $\approx 10:00$  a.m.), para disminuir a continuación hasta una ligera recuperación ya al final de la tarde,

TABLA 1

Análisis de sensibilidad intensidad de señal/ruido de los indicadores del estado hídrico de la planta estudiados. IS: intensidad de señal; CV: coeficiente de variación o ruido; S: sensibilidad.

Indicador del estado hídrico	IS	CV	S
$\Psi_{\text{tallo}}$	2,13	2,15	0,99
$\Psi_{\text{hoja}}$	1,3	5,01	0,27
$\Psi_{\text{tronco}}$	2,54	2,47	1,03
$P_n$	0,54	2,83	0,19
$g_s$	0,39	1,84	0,21

ca del  $\Psi_{\text{tronco}}$  (es decir una menor variabilidad en las medidas), con una rápida disminución respecto de su condición inicial (Tabla 1). Este hecho le posiciona como el indicador más sensible al déficit

hídrico de entre todos los estudiados en este trabajo, seguido del  $\Psi_{\text{tallo}}$ . Entre ambos indicadores se produjo un gradiente uniforme de los datos, en torno a 0,3 MPa, con una correlación  $\Psi_{\text{tronco}}$  vs.  $\Psi_{\text{tallo}}$  muy

## Los datos de $\Psi_{\text{tronco}}$ con microtensiómetros permiten la automatización del riego en nectarino

incluso bajo condiciones severas de déficit hídrico (datos no mostrados). Al restablecer finalmente el riego, las tasas fotosintéticas no recuperaron los valores del inicio del período experimental, debido a una menor radiación solar propia de la época del año y, especialmente, al inicio de la senescencia foliar característica de los árboles frutales de hoja caduca, que sucede en respuesta a la disminución en las hojas del aminoácido aspartato, implicado en la formación de cloroplastos (Conesa *et al.*, 2022).

En un análisis comparativo de sensibilidad frente al déficit hídrico de los indicadores estudiados se observó una disminución armóni-

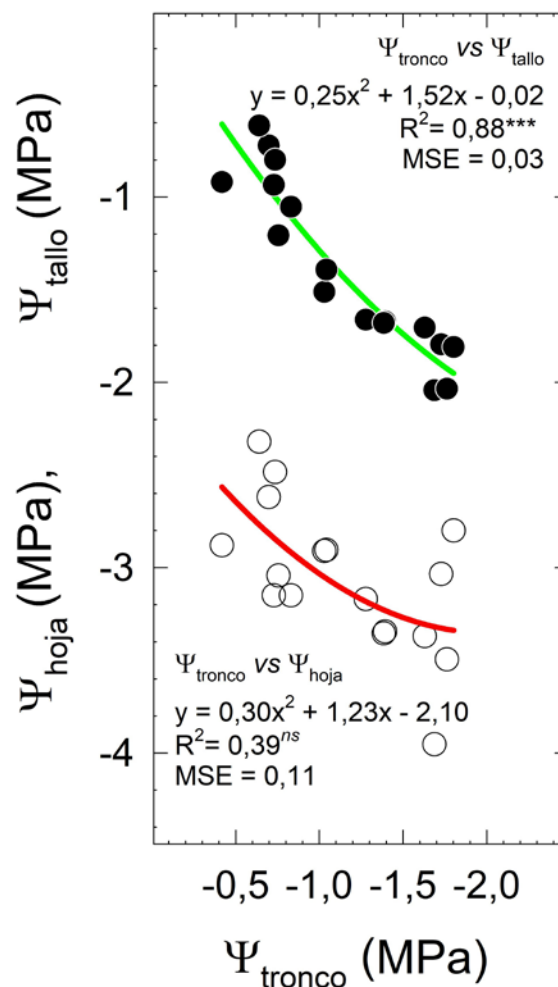


FIGURA 4

Regresión entre el potencial hídrico de tronco ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) con el potencial hídrico de tallo ( $\Psi_{\text{tallo}}$ ) y el potencial hídrico foliar ( $\Psi_{\text{hoja}}$ ) al mediodía solar (14 p.m., UTC+2).

de riego programados se cumplió el siguiente gradiente con los valores de  $\Psi_{\text{tronco}} \geq \Psi_{\text{tallo}} \geq \Psi_{\text{hoja}}$ , aumentando la influencia de las condiciones atmosféricas y la resistencia al flujo de agua a lo largo del continuo de potenciales hídricos.

La medida simultánea de  $P_n$  y  $g_s$  indicó la condición de riego impuesta en base a AMP, con valores máximos y mínimos en las fases de adecuado suministro hídrico y riego deficitario o nulo, respectivamente (Figura 3B). Durante el curso diario,  $P_n$  y  $g_s$  aumentaron desde el amanecer hasta el momento de máxima tasa fotosintética en todas las condiciones de riego estudiadas ( $\approx 10:00$  a.m.), para disminuir a continuación hasta una ligera recuperación ya al final de la tarde,

TABLA 1

Análisis de sensibilidad intensidad de señal/ruido de los indicadores del estado hídrico de la planta estudiados. IS: intensidad de señal; CV: coeficiente de variación o ruido; S: sensibilidad.

Indicador del estado hídrico	IS	CV	S
$\Psi_{\text{tallo}}$	2,13	2,15	0,99
$\Psi_{\text{hoja}}$	1,3	5,01	0,27
$\Psi_{\text{tronco}}$	2,54	2,47	1,03
$P_n$	0,54	2,83	0,19
$g_s$	0,39	1,84	0,21

ca del  $\Psi_{\text{tronco}}$  (es decir una menor variabilidad en las medidas), con una rápida disminución respecto de su condición inicial (Tabla 1). Este hecho le posiciona como el indicador más sensible al déficit

hídrico de entre todos los estudiados en este trabajo, seguido del  $\Psi_{\text{tallo}}$ . Entre ambos indicadores se produjo un gradiente uniforme de los datos, en torno a 0,3 MPa, con una correlación  $\Psi_{\text{tronco}}$  vs.  $\Psi_{\text{tallo}}$  muy

## Los datos de $\Psi_{\text{tronco}}$ con microtensiómetros permiten la automatización del riego en nectarino

incluso bajo condiciones severas de déficit hídrico (datos no mostrados). Al restablecer finalmente el riego, las tasas fotosintéticas no recuperaron los valores del inicio del período experimental, debido a una menor radiación solar propia de la época del año y, especialmente, al inicio de la senescencia foliar característica de los árboles frutales de hoja caduca, que sucede en respuesta a la disminución en las hojas del aminoácido aspartato, implicado en la formación de cloroplastos (Conesa *et al.*, 2022).

En un análisis comparativo de sensibilidad frente al déficit hídrico de los indicadores estudiados se observó una disminución armóni-

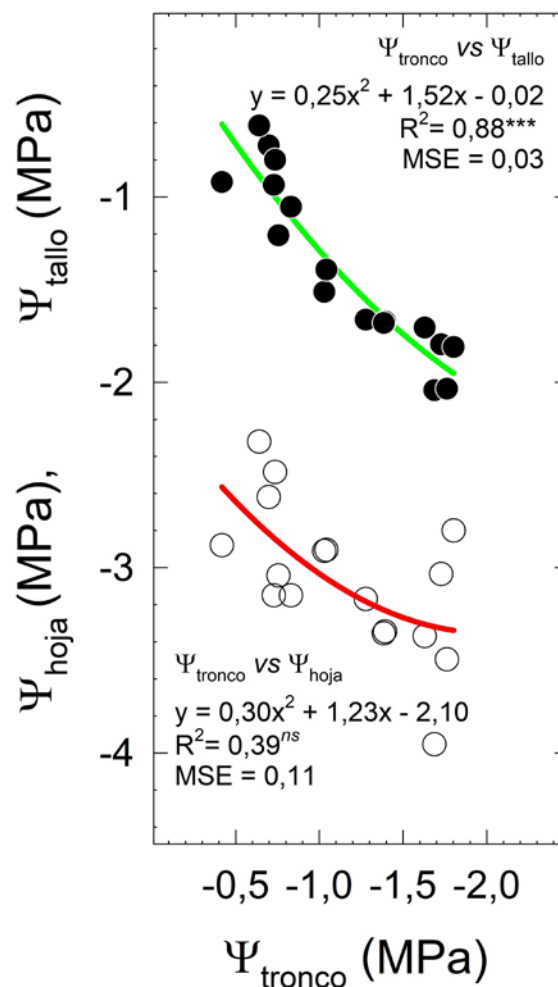


FIGURA 4

Regresión entre el potencial hídrico de tronco ( $\Psi_{\text{tronco}}$ ) con el potencial hídrico de tallo ( $\Psi_{\text{tallo}}$ ) y el potencial hídrico foliar ( $\Psi_{\text{hoja}}$ ) al mediodía solar (14 p.m., UTC+2).