

Di Lorenzi, A.; Puppo, L. Teledetección del estrés hídrico en maíz: aplicación de la termometría infrarroja bajo riego deficitario en clima templado

Teledetección del estrés hídrico en maíz: aplicación de la termometría infrarroja bajo riego deficitario en clima templado

Di Lorenzi, Andrés ^{1,2} Puppo, Lucía ²

¹ Insituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) - Uruguay, Uruguay

² Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay

ORCID: Di Lorenzi [0009-0004-6324-6531](https://orcid.org/0009-0004-6324-6531) Puppo [0009-0004-3529-8473](https://orcid.org/0009-0004-3529-8473)

Correspondencia: a.dilorenzi@gmail.com lpuppo@fagro.edu.uy

RESUMEN

El riego deficitario, apoyado en termometría infrarroja para monitoreo continuo y no destructivo, permite optimizar el uso del agua en maíz, reduciendo el consumo sin comprometer el rendimiento y favoreciendo una producción más sostenible y rentable frente al cambio climático y la escasez hídrica. El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta térmica y fisiológica del maíz bajo distintos niveles de riego deficitario, analizando la relación entre la temperatura foliar, el estado hídrico del suelo y la fisiología del cultivo. El ensayo se realizó en el Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía, bajo un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones y riego localizado (16 mm). Se evaluaron cuatro tratamientos: 100% ETC todo el ciclo; 50% ETC en etapa vegetativa y 100% desde floración a llenado de grano; 80% ETC hasta llenado de grano; y secano. Se midieron conductancia estomática, potencial xilemático e índices térmicos. Se observó una relación cuadrática significativa entre la conductancia estomática y el contenido de agua del suelo ($R^2 = 0,7$), confirmando la sensibilidad fisiológica al déficit hídrico. Los índices térmicos DANS y DACT permitieron diferenciar los tratamientos y mostraron alto potencial operativo por su simplicidad. Estos resultados destacan el valor de la termometría infrarroja para la gestión del riego en maíz en clima templado y su potencial integración con drones térmicos para el monitoreo a escala de campo.


Palabras clave: programación del riego, gestión del riego agrícola, uso eficiente del agua

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 16 febrero 2026


Teledetección del estrés hídrico en maíz: aplicación de la termometría infrarroja bajo riego deficitario en clima templado

Di Lorenzi, Andrés ⁽¹⁾, Puppo, Lucía ⁽²⁾

⁽¹⁾ Insituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) - Uruguay, Uruguay, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay.

 0009-0004-6324-6531, a.dilorenzi@gmail.com.

⁽²⁾ Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay.

 0009-0004-3529-8473, lpuppo@fagro.edu.uy.

Resumen: El riego deficitario, apoyado en termometría infrarroja para monitoreo continuo y no destructivo, permite optimizar el uso del agua en maíz, reduciendo el consumo sin comprometer el rendimiento y favoreciendo una producción más sostenible y rentable frente al cambio climático y la escasez hídrica. El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta térmica y fisiológica del maíz bajo distintos niveles de riego deficitario, analizando la relación entre la temperatura foliar, el estado hídrico del suelo y la fisiología del cultivo. El ensayo se realizó en el Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía, bajo un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones y riego localizado (16 mm). Se evaluaron cuatro tratamientos: 100% ETc todo el ciclo; 50% ETc en etapa vegetativa y 100% desde floración a llenado de grano; 80% ETc hasta llenado de grano; y secano. Se midieron conductancia estomática, potencial xilemático e índices térmicos. Se observó una relación cuadrática significativa entre la conductancia estomática y el contenido de agua del suelo ($R^2 = 0,7$), confirmando la sensibilidad fisiológica al déficit hídrico. Los índices térmicos DANS y DACT permitieron diferenciar los tratamientos y mostraron alto potencial operativo por su simplicidad. Estos resultados destacan el valor de la termometría infrarroja para la gestión del riego en maíz en clima templado y su potencial integración con drones térmicos para el monitoreo a escala de campo.

Palabras clave: programación del riego, gestión del riego agrícola, uso eficiente del agua

Remote sensing of water stress in maize: application of infrared thermometry under deficit irrigation in a temperate climate

Abstract: Deficit irrigation, supported by infrared thermometry for continuous and non-destructive monitoring, enables optimization of water use in maize, reducing consumption without compromising yield and promoting more sustainable and profitable production under climate change and water scarcity. The objective of this study was to evaluate the thermal and physiological response of maize under different deficit irrigation levels, analyzing the relationship between leaf temperature, soil water status, and crop physiology. The experiment was conducted at the Centro Regional Sur, Faculty of Agronomy, under a randomized block design with four replications and localized irrigation (16 mm). Four treatments were evaluated: 100% ETc throughout the cycle; 50% ETc during the vegetative stage and 100% from flowering to grain filling; 80% ETc until the end of grain filling; and rainfed conditions. Stomatal conductance, stem water potential, and thermal indices were measured. A significant quadratic relationship was found between stomatal conductance and soil water content ($R^2 = 0.7$), confirming the physiological sensitivity to water deficit. The thermal indices DANS and DACT successfully differentiated treatments and showed high operational potential due to their simplicity. These results highlight the value of infrared thermometry for irrigation management in maize under temperate climates and its potential integration with thermal drones for field-scale monitoring.

Keywords: irrigation scheduling, agricultural water management, water use efficiency

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay, el maíz se cultiva mayormente en secano, con alta variabilidad de rendimiento y alto riesgo por sequía, por lo que el riego suplementario requiere técnicas más eficientes de programación. La

temperatura del dosel medida con radiómetros infrarrojos constituye una herramienta de sensoramiento remoto proximal que permite monitorear el estrés hídrico de forma continua y remota, mediante índices como el CWSI, DANS: diferencia entre la temperatura del dosel del cultivo y la de un cultivo de referencia no estresado

y DACT: diferencia entre la temperatura del dosel del cultivo y un umbral térmico fijo (28 °C), ampliamente evaluados a nivel internacional pero poco estudiados en climas templados. Este enfoque sienta las bases para el uso de drones térmicos como siguiente paso hacia el sensoramiento remoto a escala de campo. Por ello, este estudio evalúa la capacidad de índices térmicos para detectar el estrés hídrico en maíz bajo riego deficitario, analizando su relación con variables fisiológicas (conductancia estomática y potencial xilemático) y el estado hídrico del suelo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en el Centro Regional Sur (CRS) de la Facultad de Agronomía, ubicado en Progreso, Canelones, Uruguay (34°37' S y 56°13' O). De acuerdo con la clasificación de Köppen y Geiger, el clima corresponde a un templado mesotérmico (Cfa), caracterizado por la ausencia de estación seca y veranos calurosos. La precipitación anual promedio es de 1200 mm, con una alta variabilidad interanual e irregularidad estacional. Durante el período estival, la temperatura media oscila entre 18 y 23 °C, con una radiación diaria de 200-250 Wm⁻² y una humedad relativa del 72 %. El suelo en el área experimental fue un Brunosol Eútrico típico Lac., clasificado como Argiudol típico (USDA).

Se establecieron cuatro tratamientos de riego: 100 % de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante todo el ciclo; 80 % de la ETc durante todo el ciclo; 50 % de la ETc en etapa vegetativa (hasta Vt), incrementándose al 100 % desde floración (R1) hasta llenado de grano (R4); y un tratamiento de secano. Estos niveles fueron definidos para generar distintos grados de estrés hídrico, incluyendo condiciones sin limitación y déficits moderados y severos. El riego se programó mediante un balance hídrico diario del suelo, ajustando las láminas aplicadas en función de la ETc estimada y el contenido de agua en el suelo. El diseño experimental utilizado fue en bloques completos al azar (DBCA), con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Las parcelas fueron de 12 x 6 m, con 12 filas separadas por 0,50 m. El experimento se desarrolló durante la campaña 2024-2025.

Se sembró el híbrido de alto potencial DK7210bt3P de Bayer mediante siembra directa, con una densidad objetivo de 100.000 plantas ha⁻¹. Para el control de malezas, se realizaron aplicaciones de herbicidas pre y postsiembra. En función de un análisis de suelo previo, se aplicó fertilización en la siembra y refertilizaciones en V6 y V10 para evitar restricciones nutricionales. El riego se realizó con goteros de 4 L h⁻¹ separados por 1,0 m, aplicando láminas brutas de 16 mm (Morales *et al.*, 2022). El momento de riego se determinó mediante un balance hídrico diario (BHS), según FAO 56 (Allen *et al.*, 1998). Se utilizaron datos climáticos de la estación meteorológica HOBO RX3000 (Onset Computer Corporation, Massachusetts, EE.UU.) instalada en el sitio experimental. La humedad del suelo se midió de 2 a 3 veces por semana con una sonda de capacitancia portátil (FDR, Delta T Devices, PR2), calibrada previamente, con el objetivo de ajustar el BHS si era necesario.

Se instalaron radiómetros térmicos infrarrojos (IRT, modelo SI-421, Apogee Instruments, Inc., Logan, Utah, EE.UU.) en una parcela por tratamiento, para registrar la temperatura del dosel cada 15 minutos con dataloggers ZL6 Meter (EE.UU.). Para garantizar una adecuada captura del dosel, los sensores se montaron en postes telescópicos a 0,6 m sobre el dosel y en un ángulo de 65° hacia el oeste. No se instalaron sensores IRT en el tratamiento 50%/100%.

Se calcularon cuatro indicadores térmicos: 1) índice de estrés hídrico (CWSI) (Jackson *et al.*, 1981; Idso, 1982); 2) diferencia entre la temperatura del dosel y la temperatura del aire (Dif Tc-Ta) (DeJonge *et al.*, 2015; Jones, H.G., 2018); 3) grados sobre el dosel sin estrés (DANS) (Taghvaeian *et al.*, 2014); y 4) grados sobre el umbral del dosel de 28°C (DACT) (DeJonge *et al.*, 2015). Para los cálculos se utilizaron valores de temperatura media del dosel en días con radiación solar superior a 700 W m⁻² similar a lo propuesto por DeJonge *et al.* (2015), eliminando interferencias de la nubosidad. Se utilizó una cámara térmica HT-19 (HTI-Xintai, China) de alta resolución y precisión para medir la temperatura en cada parcela al mediodía. Se capturaron dos imágenes por parcela a 0,6 m sobre el dosel y en ángulo oblicuo (45°), en días despejados (radiación > 700 W m²) entre las 12:00 y 15:00 h (Irmak *et al.*, 2000; Taghvaeian *et al.*, 2012, 2014). Las imágenes se procesaron con IRImageTools. Se seleccionaron 20 hojas por imagen evitando la inclusión de otros órganos o suelo, se calculó la media y desvío por parcela.

Se midió el potencial xilemático con cámara de presión (Scholander) y la conductancia estomática con un porómetro (SC-1, METER Group), en hojas completamente desarrolladas a media altura. Se evaluaron 2-3 hojas por parcela, seleccionadas de plantas representativas dentro del área útil, evitando bordes, entre las 12:30 y 14:30 h.

Se realizó una regresión cuadrática entre la conductancia estomática y el porcentaje de agua disponible a 0,40 m. Para el potencial xilemático y la conductancia estomática se aplicó ANOVA y prueba de Tukey (p < 0,05), indicando diferencias significativas entre tratamientos cuando correspondió. Los análisis se realizaron en R (R Core Team, 2024).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó una clara distinción entre los tratamientos bajo riego y el secano (Figura 1). De manera similar a lo que se encontró en los resultados del contenido de agua del suelo (Figura 3), los tratamientos con riego al 100% de la ETc y al 50%/100% de la ETc no mostraron diferencias significativas entre sí. Este comportamiento indica que ambas estrategias de riego proporcionaron condiciones suficientemente similares para el desarrollo de las plantas en cuanto a la disponibilidad hídrica, al menos durante este período de evaluación. Un punto destacado fue la presencia de valores excepcionalmente altos de conductancia estomática en los tratamientos bajo riego en las fechas del 17/01 y 24/01. Estos picos pueden atribuirse a los elevados contenidos de agua en el suelo derivados del riego previo a las mediciones, lo

que probablemente favoreció la apertura estomática en esas fechas (Toro *et al.*, 2019).

No se observaron diferencias notables en el potencial xilemático (ψ) entre los tres tratamientos bajo riego.

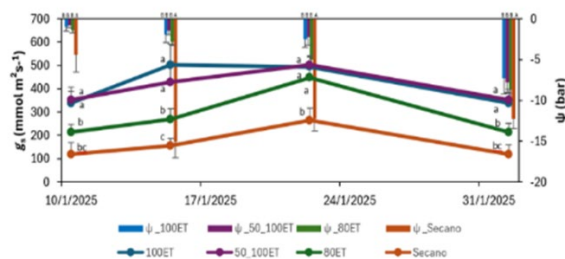


Figura 1. Conductancia estomática (g_s , $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y potencial xilemático (ψ , bar) en diferentes momentos del ciclo del cultivo. Las mediciones fueron hechas durante el mismo momento entre las 12:30 y 14:30 h. Letras diferentes indican diferencias significativas en la misma fecha de evaluación ($p < 0,05$). Se utilizaron letras mayúsculas para la variable ψ y minúsculas para la variable g_s .

Esto sugiere que, a pesar de las distintas estrategias de riego, los contenidos de agua del suelo no fueron lo suficientemente variables como para generar un estrés hídrico considerable. Sin embargo, el secano mostró valores de ψ inferiores a -12 bar, indicando un estrés hídrico en la planta debido al déficit de agua en el suelo.

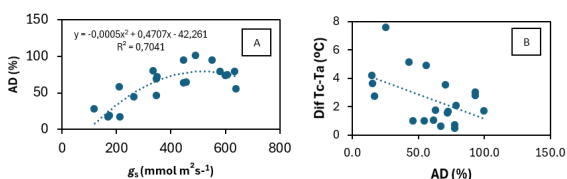


Figura 2. (a) Relación entre la conductancia estomática (g_s) y el porcentaje de agua disponible en el suelo a 0,40 m (AD %); (b) evolución de la diferencia de temperatura entre el dosel y el aire (Dif Tc-Ta) en relación con el porcentaje de agua disponible en el suelo a 0,40 m (AD %). Nota: Los datos de temperatura se obtuvieron con cámara HTI.

En la Figura 2a se observó una relación cuadrática significativa ($R^2=0.7041$), indicando que la g_s aumenta con el contenido de agua en el suelo hasta un umbral, a partir del cual tiende a estabilizarse o disminuir. Este comportamiento sugiere un posible efecto de regulación estomática frente a condiciones de menor disponibilidad hídrica. Al analizar la Dif Tc-Ta medida con la cámara HTI, que ofrece alta precisión en la determinación de la temperatura foliar, se observa una relación inversa con el porcentaje de agua disponible en el suelo (Figura 2b). Cuando el contenido de agua en el suelo desciende por debajo del 50 %, la diferencia Tc-Ta aumenta, alcanzando valores cercanos a 5, con un máximo de 7 (Figura 2b). Cabe señalar que en esta temporada se registraron pocos datos con niveles de agua en el suelo inferiores al 50 %, lo que podría haber limitado la manifestación más clara de esta relación. DeJonge *et al.* (2015) encontraron relaciones entre los térmicos CWSI, DANS, y DACT con el contenido de agua en el suelo con un R^2 que varió entre 0,138 y 0,319.

Los índices térmicos reflejaron el régimen hídrico de los tratamientos (Figura 3a-d). Para su cálculo, se utilizaron valores promedio de temperatura del aire y del cultivo entre las 14:00 y 15:00 h, periodo en el que se evidenciaron mayores diferencias térmicas. En climas áridos y semiáridos, el período óptimo es entre las 12:00 y las 13:00 h, cuando el CWSI alcanza su valor máximo. (Irmak *et al.*, 2000; Taghvaeian *et al.*, 2012). El CWSI y la Dif Tc-Ta discriminaron claramente entre los tratamientos. En los tratamientos bajo riego, la transpiración mantuvo el dosel más fresco que el aire circundante, alcanzando hasta 4°C de diferencia en el tratamiento 100% ETC. En contraste, en secano, donde la transpiración se reduce por la limitación hídrica, la temperatura del dosel fue superior a la del aire, con valores positivos de Dif Tc-Ta de hasta 5°C (Figura 3a). Se observaron valores levemente negativos de CWSI en el tratamiento 100% ETC, lo que sugiere la necesidad de continuar con más años de evaluación para mejorar su ajuste. Sin embargo, DeJonge *et al.* (2015) demostraron que variaciones repentinas en la velocidad del viento pueden generar valores negativos de CWSI sin cambios en el contenido de agua del suelo. En este sentido, los índices DANS y DACT no reflejan dicha caída, lo que indica una menor sensibilidad a fluctuaciones del viento. Este resultado destaca la sensibilidad de los índices térmicos para detectar cambios en el estado hídrico del cultivo en respuesta a la disponibilidad de agua en el suelo, en concordancia con los patrones analizados previamente en las Figuras 2 a 3 y lo encontrado por Morales-Santos y Nolz (2023), DeJonge *et al.* (2015) y Taghvaeian *et al.* (2012). Algunos autores destacan que el CWSI puede presentar dificultades prácticas debido a su complejidad de cálculo y calibración (Kacira *et al.*, 2002), por lo que índices como DANS, DACT, y Dif Tc-Ta podrían representar opciones más prácticas y accesibles para productores y técnicos.

Otro desafío del CWSI es que, en días extremadamente calurosos, incluso un cultivo bien irrigado puede cerrar sus estomas, elevando el índice y sugiriendo una necesidad de riego que podría no ser real. En contraste, DANS no presenta esta limitación. Además, algunos autores destacan las dificultades prácticas del uso del CWSI debido a su complejidad (Kacira *et al.*, 2002), sugiriendo que los índices DANS, DACT y Dif Tc-Ta pueden ser opciones más prácticas para productores y técnicos. Finalmente, en nuestro estudio, el índice DANS permitió diferenciar levemente entre los tratamientos bajo riego, mientras que el DACT no mostró esta capacidad (Figura 2c y d). No obstante, ambos índices fueron eficaces para distinguir entre los tratamientos bajo riego y el secano, lo que indica su potencial en condiciones de clima templado.

4. CONCLUSIONES

Los índices térmicos permitieron diferenciar claramente entre el cultivo bajo riego y en secano, confirmando su utilidad para detectar el estrés hídrico en soja en clima templado. Sin embargo, DANS y DACT mostraron menor sensibilidad para discriminar entre tratamientos irrigados, lo que sugiere la necesidad de evaluar estos índices bajo un mayor rango de niveles de estrés hídrico. En conjunto, los resultados demuestran el potencial de

la termometría infrarroja como herramienta para el monitoreo del estado hídrico y la programación del riego en clima templado. No obstante, se requieren evaluaciones adicionales en múltiples temporadas para mejorar la precisión y robustez de estos índices en condiciones climáticas variables.

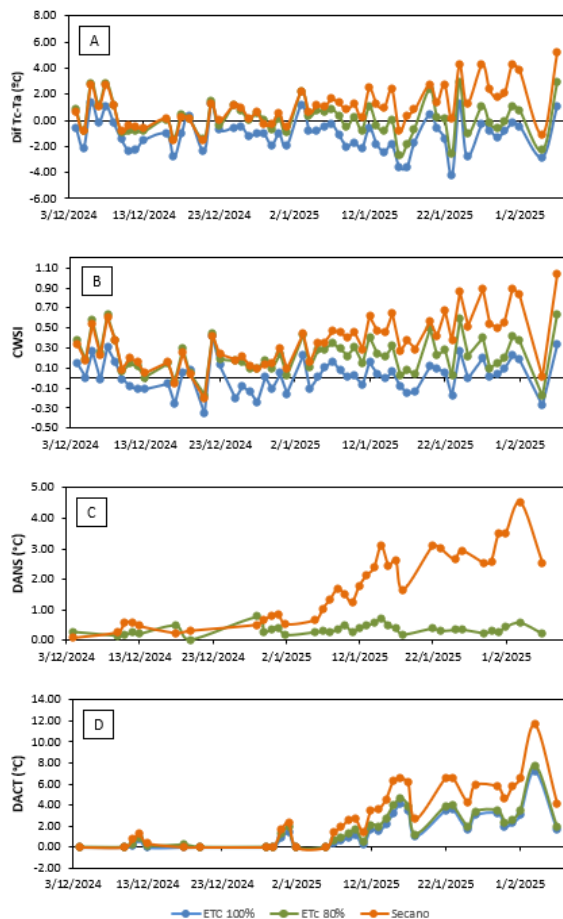


Figura 3. Evolución de: (a) la diferencia de temperatura entre el dosel y el aire ($Dif T_c-T_a$), (b) el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), (c) los grados por encima de un cultivo sin estrés hídrico (DANS), (d) los grados por encima de un umbral (28°C) (DACT), durante el ciclo 2024-2025.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Álvaro Otero por su apoyo y orientación, cuyos consejos fueron clave para el desarrollo de este trabajo.

6. REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO.

Burke, J. J. (1996). Personal communication to S. R. Evett from the USDA-ARS, Crop Stress Research Laboratory, Lubbock, TX.

DeJonge, K. C., Taghvaeian, S., Trout, T. J., & Comas, L. H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*, 156, 51–62.

Hsiao, T. C. (1973). Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24(1), 519–570.

Idso, S. B. (1982). Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27, 59–70.

Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92(6), 1221–1227.

Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4). <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>

Jones, H. G. (2018). Thermal imaging and infrared sensing in plant ecophysiology. In *Advances in plant ecophysiology techniques* (pp. 135–151).

Kacira, M., Ling, P. P., & Short, T. H. (2002). Establishing crop water stress index (CWSI) threshold values for early, non-contact detection of plant water stress. *Transactions of the ASAE*, 45(3), 775–780.

Kramer, P. J., & Tejada, L. (1974). Relaciones hídricas de suelo y plantas: Una síntesis moderna. CRAT.

Morales, P. M., Blanco, A. B., Prechac, F. G., Gallareta, C. G., & Benito, J. M. T. (2022). Avaliação do desenho e funcionamento dos pivôs centrais instalados no Uruguai. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(1), 279–294.

Otero, A., & García, C. (2024). Simposio sobre riego: Sensoramiento remoto y manejo eficiente del agua en los sistemas productivos agrícolas (6–7 de marzo de 2024). INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 66). FAO.

Taghvaeian, S., Chávez, J. L., & Hansen, N. C. (2012). Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in Northeastern Colorado. *Remote Sensing*, 4(11), 3619–3637.

Taghvaeian, S., Comas, L. H., DeJonge, K. C., & Trout, T. J. (2014). Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. *Agricultural Water Management*, 144, 69–80.

Toro, G., Flexas, J., & Escalona, J. M. (2019). Contrasting leaf porometer and infra-red gas analyser methodologies: An old paradigm about the stomatal conductance measurement. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 31, 483–492. <https://doi.org/10.1007/s40626-019-00161-x>

Zhang, L., Zhang, H., Zhu, Q., & Niu, Y. (2023). Further investigating the performance of crop water stress index for maize from baseline fluctuation, effects of environmental factors, and variation of critical value. *Agricultural Water Management*, 285, 108349.