



**MAÍZIFICANDO
CONCIENCIA**
XII CONGRESO NACIONAL DE MAÍZ

Eje

Ecofisiología y manejo del cultivo

8, 9 y 10 de Noviembre
Pergamino, BA
UNNOBA



Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Ministerio de Economía
Argentina

2022





EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA TRANSPIRADA EN MAÍZ: VARIACIÓN A LO LARGO DE UN GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO EN LA REGIÓN CENTRAL DE ARGENTINA

Riglos, M.M.¹; Mercau, J.L.²; Mayer, L.I.⁶; Haro, R.J.³; Severina, I.³; Cirilo, A.G.⁴; Otegui, M.E.⁵.

1 CONICET-INTA, EEA San Luis, provincia San Luis. riglos.maximiliano@inta.gob.ar

2 INTA, AER San Luis, provincia de San Luis. mercau.jorge@inta.gob.ar

3 INTA, EEA Manfredi, provincia de Córdoba. haro.ricardo@inta.gob.ar; severina.ignacio@inta.gob.ar

4 INTA, EEA Pergamino, provincia de Buenos Aires. cirilo.alfredo@inta.gob.ar

5 CONICET-INTA, EEA Pergamino, provincia de Buenos Aires. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. otegui@agro.uba.ar

6 INTA, EEA San Luis provincia San Luis (actualmente NIDERA seeds). mayer@agro.uba.ar

TRANSPIRED WATER USE EFFICIENCY IN MAIZE: VARIATION ACROSS AN EDAPHOCLIMATIC GRADIENT IN THE CENTRAL REGION OF ARGENTINA.

Abstract

Water use efficiency (WUE) for biomass (B) production based on transpired (T) water (WUEB,T) is assumed to be relatively constant for a given species. This trait, however, can be modified by VPD and soil water content, which vary across environments. In current research we assessed the effect of VPD and soil water availability during the reproductive phase of maize crops grown in the field during two growing seasons at three contrasting edaphoclimatic environments (humid: RPH, sub-humid: RSH and semi-arid: RSC, with increased soil clay content from RSC to RPH) of the temperate Central region of Argentina. Early and late sowing dates were also evaluated at each site. Measurements included crop shoot biomass (B), crop evapotranspiration (ETc) and intercepted photosynthetically active radiation (PARac). T and WUEB,T were estimated. B was always larger at RPH (1535 g m⁻²) than at RSH (1159 g m⁻²) and RSC (1101 g m⁻²), whereas T was more dependent upon the growing season (RPH and RSC) or the sowing date (RSH). Collectively, WUEB,T was larger at RPH (6.5 g m⁻²mm⁻¹) than at RSH (5.6 m⁻²mm⁻¹) and RSC (4.8 g m⁻²mm⁻¹), and variations in WUEB,T/DPV were strongly and negatively affected by variations in T.

Palabras claves

Maíz (*Zea mays L.*), Productividad hídrica, Eficiencia en el uso del agua, déficit de presión de vapor

Keywords

Maize (*Zea mays L.*), Water productivity, Water use efficiency, vapor pressure deficit



Introducción

Producir alimentos suficientes para una población creciente a partir de una fuente limitada de recursos, como el agua, requiere del diseño estratégico de los sistemas productivos (Caviglia et al. 2013; Andrade y Satorre 2015). En la actualidad, la comprensión de los factores que modifican la eficiencia en el uso del agua (EUA) en las principales especies cultivadas, como lo es el maíz, se ha convertido en un aspecto central de la ecofisiología (Lobell et al. 2013), especialmente en regiones marginales. Es por eso que explorar la variabilidad de este rasgo en un gradiente ambiental amplio resulta de gran relevancia actual y futura.

La EUA reconoce diferentes escalas, según sea el producto (biomasa total o grano) y el insumo (transpiración, evapotranspiración, lluvia en el ciclo) que se utilicen para su estimación (Sinclair et al. 1984). Cuando se emplean la biomasa aérea (B) y el agua transpirada (T), la EUA resultante (EUA_{B,T}) se considera un rasgo relativamente constante de la especie para plantas creciendo sin limitaciones hídrico-nutricionales, siendo el paso fotosintético (C4 > C3) el principal determinante de las diferencias. Sin embargo, el nivel de insaturación de la atmósfera o déficit de presión de vapor (DPV) puede modificarla (Dardanelli et al. 2003; Abbate et al. 2004; Kemanian et al. 2005), al igual que la disponibilidad hídrica del suelo (Abbate et al. 2004). En el caso del DPV, porque un mayor nivel de insaturación puede modificar la pérdida de agua desde las plantas sin necesariamente modificar su capacidad de fijar carbono, lo cual provocaría una disminución la EUA_{B,T}. En el caso del agua disponible, porque una disminución en la conductividad del canopeo (asociada a un cierre estomático en respuesta a una disminución del contenido hídrico del suelo) afecta proporcionalmente más a la T que a la fijación de C (Nobel y Jordan 1983), pudiendo aumentar la EUA_{B,T}. Si bien se ha avanzado en la comprensión de las variaciones observadas en EUA_{B,T}, pocos estudios han analizado sus cambios ante variaciones en factores ambientales como el DPV y el contenido hídrico del suelo durante la ventana de máxima cobertura foliar, reduciendo la certidumbre de los modelos ecofisiológicos que utilizan a la EUA como criterio predictivo de la productividad.

El objetivo del presente trabajo fue analizar la variación en EUA_{B,T} de cultivos de maíz creciendo en un rango amplio de condiciones ambientales, con el fin de exponerlos a un gradiente suficientemente importante de DPV y agua disponible en el suelo. Para generar dicho gradiente se condujeron experimentos a campo combinando tres sitios ubicados en regiones agroclimáticamente contrastantes de la zona central de Argentina, durante dos campañas agrícolas y en dos épocas de siembra.

Materiales y Métodos

Los experimentos se llevaron a cabo durante dos campañas agrícolas (Camp1: 2016/17 y Camp2: 2017/18) en tres estaciones experimentales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA): Villa Mercedes (33° 39' S, 65° 25' O), Manfredi (31° 49' S, 63° 46' O) y Pergamino (33° 56' S, 60° 33' O). La primera se ubica dentro de la Región Semiárida Central (RSC), en la provincia de San Luis, la segunda en la Región Sub-Húmeda (RSH), en la provincia de Córdoba y la última en la zona núcleo de la Región Pampeana Húmeda (RPH), en la provincia de Buenos Aires. Los suelos de los experimentos fueron Ustipsament típico (RSC), Haplustol éntico (RSH) y Argiudol típico (RPH). En cada sitio experimental se realizaron dos fechas de siembra (FS), temprana (FS1: fin de octubre) y tardía (FS2: principio de diciembre). Se utilizó un único genotipo comercial de ciclo adecuado y



difundido en las tres regiones (DK 72-10), que se sembró a razón de 55000 (RSC) u 80000 plantas ha^{-1} (RSH y RPH) en un único espaciamento entre hileras (52 cm). En todos los casos se fertilizó con nitrógeno ($200 \text{ kg de N ha}^{-1}$) y fósforo ($30 \text{ kg de P ha}^{-1}$). Los ensayos fueron conducidos en secano (RSH y RSC) o con riego estratégico complementario (RPH). Se realizaron los controles de malezas, plagas y enfermedades correspondientes para minimizar el efecto de adversidades bióticas.

En cada uno de los experimentos se evaluó la fenología siguiendo la escala de Ritchie y Hanway (1982) sobre un mínimo de 6-10 plantas hilera $^{-1}$, identificando claramente (i) el período crítico (PC) para la determinación del número de granos (Figura 1), y (ii) la ventana reproductiva (Vent), como el período que se extiende desde el inicio del PC hasta etapas cercanas a madurez fisiológica (R6; Figura 1).

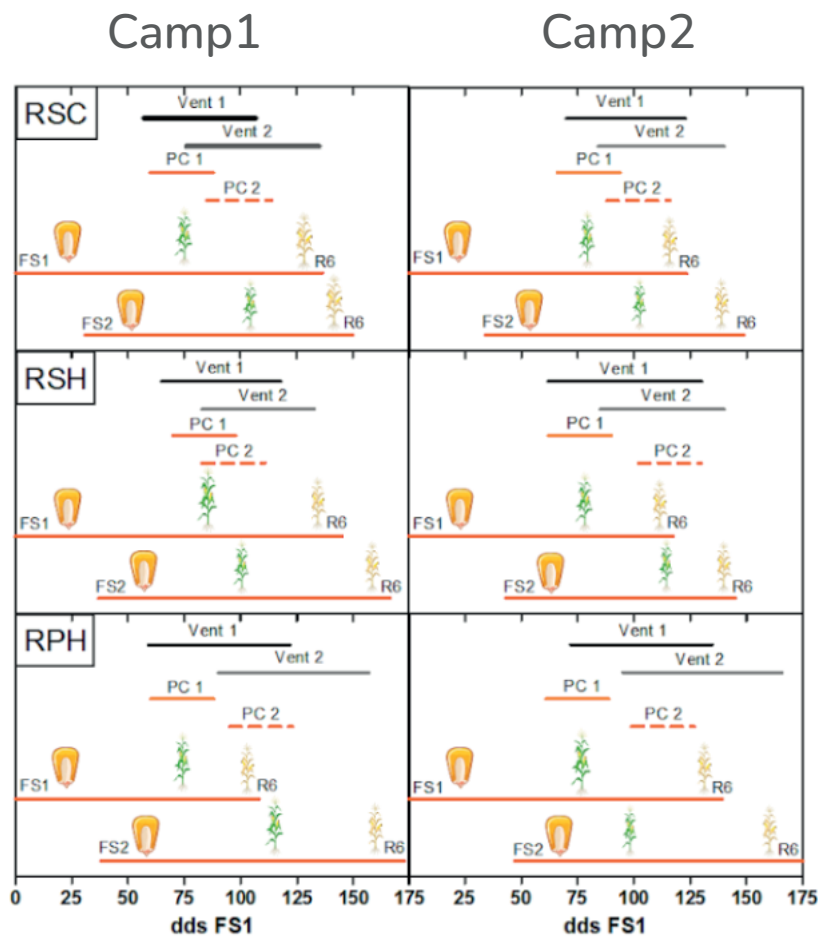


Figura 1. Descripción de la fenología del cultivo, identificando la ubicación de la ventana reproductiva (Vent 1 y 2) y el período crítico (PC 1 y 2) para cada sitio (RSC: Región Semiárida Central; RSH: Región Sub-Húmeda; RPH: Región Pampeana Húmeda) y fecha de siembra (FS1 y FS2) en dos campañas (Camp 1 y 2).

Las mediciones efectuadas fueron: (i) contenido hídrico del suelo (CHS) hasta 2 m de profundidad a lo largo del ciclo, de forma gravimétrica (RSC) o gravimétrica (0-30 cm) + sonda de neutrones (RSH y RPH); (ii) Evapotranspiración acumulada del cultivo (ETc, mm) por balance hídrico; (iii) Producción de biomasa aérea total acumulada (B, en g m^{-2}) a través de muestreos destructivos a lo largo del ciclo, (iv) eficiencia de interceptación (ei) durante el ciclo, por mediciones sucesivas con ceptómetro lineal. Se calculó: (i) la EUA transpirada para producir biomasa (EUAB,T, $\text{g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$), como el cociente entre la B y la transpiración (T), (iii) la evaporación del suelo (Es, mm), como el producto entre la Es de un suelo sin cobertura (estimada a partir de la demanda y el CHS hasta 30 cm; Ritchie 1972), y la



fracción de la radiación incidente no interceptada por el cultivo ($E_s \times (1 - e_i)$); (Villalobos y Fereres 1990), (iv) la transpiración del cultivo (T , mm), como la diferencia entre los valores acumulados de E_{Tc} y E_s , y (v) la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada acumulada (RFA_{ac}) durante los períodos de interés, como la sumatoria de los valores diarios de $e_i \times RFA$ incidente en esos períodos. Las relaciones entre variables se evaluaron por análisis de componentes principales (ACP) realizado con Infostat (Di Rienzo et al. 2011).

Resultados

Ambas campañas analizadas correspondieron a fases La Niña del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), aunque la intensidad de la fase fue mayor en el segundo que en el primer año (NOAA, 2022). Como promedio a través de ambientes, las precipitaciones desde comienzo de octubre hasta fin de abril fueron mayores en la Camp1 (796 mm) que en la Camp2 (550 mm). Las tres regiones difirieron en las variables climáticas registradas. Los valores de las precipitaciones de octubre a abril descendieron en sentido Este-Oeste (RPH 539 mm, RSH 436 mm, RSC 420 mm) como promedio de ambas campañas, siguiendo el patrón de las precipitaciones medias históricas anuales ($1030 > 790 > 700$ mm, para el período 1971 a 2017). La tendencia fue inversa para el DPV, que aumentó de Este a Oeste (RPH 1.19 kPa, RSH 1.57 kPa, RSC 1.64 kPa).

Los doce ambientes generados permitieron explorar una amplia variación en las condiciones ambientales, las cuales dieron lugar a diferencias en las variables medidas (Tabla 1). En general, se obtuvieron mayores niveles de B en la Camp1 que en la Camp2 ($1335 > 1195$ g m⁻²), en coincidencia con el mayor nivel de lluvias del primero (datos no mostrados) y consecuentemente menor DPV ($1.82 > 1.52$ kPa). El DPV fue siempre mayor en la RSC (2 kPa) y RSH (1.71 kPa) que en la RPH (1.30 kPa), mientras que los valores de B promedio fueron menores en RSC y RSH (1101 y 1159 g m⁻², respectivamente) en contraposición con la RPH que presentó los más altos (1535 g m⁻²). Hubo una estrecha relación entre B y RFA_{ac} , siendo esta última mayor en RPH (535 MJ m⁻²) que en la RSC (395 MJ m⁻²) y RSH (383 MJ m⁻²). Algo similar ocurrió con la T , que fue mayor en RPH (240 mm) y RSC (236 mm) respecto a RSH (209mm). Dadas las reducidas diferencias en T y amplias en B entre regiones, las $EUAB,T$ calculadas para todo el ciclo fueron en RPH>RSH>RSC con valores de $6.5 > 5.6 > 4.8$ g m⁻²mm⁻¹. Al corregir la T por el DPV desaparecieron las diferencias en EUA entre sitios ($EUAB,T/DPV \approx 9.6$ g kPa m⁻²mm⁻¹). Comparando ambas fechas de siembra, los valores de B fueron semejantes para RPH (1514 y 1556 g m⁻² para FS1 y FS2, respectivamente) y RSH (1164 y 1155 g m⁻²), pero diferentes para la RSC (861 y 1342 g m⁻²). En la RSC, la $EUAB,T$ de la FS2 superó siempre a la de la FS1, mientras que en la RSH la tendencia fue opuesta ($EUAB,T$ FS1 > $EUAB,T$ FS2). Por su parte, en la RPH dependió de la campaña (en la Camp1, $EUAB,T$ FS1 > $EUAB,T$ FS2 y en la Camp2, $EUAB,T$ FS2 > $EUAB,T$ FS1). Sin embargo, no existió interacción Sitio x Camp x FS para este rasgo. Algo similar ocurrió, cuando la EUA fue corregida por el DPV ($EUAB,T/DPV$), resaltando la importancia del ambiente sobre la productividad hídrica del maíz.



Tabla 1. Valores medios de las variables evaluadas en maíces sembrados en tres sitios durante dos campañas (Camp) con dos fechas de siembra (FS).

Sitio	Camp	FS	DPV kPa	Pp+R+A Uiv mm	RFAac MJ m ⁻²	B g m ⁻²	T mm	EUA _{B,T} g m ⁻² mm ⁻¹	EUA _{B,T/DPV} g kPa m ⁻² mm ⁻¹
RSC	1	1	1.9	390	367	1048	275	3.8	7.3
		2	1.8	392	458	1472	344	4.3	7.8
	2	1	2.2	293	348	675	145	4.7	10.2
		2	2.1	286	409	1213	187	6.5	13.7
RSH	1	1	1.7	583	374	1139	152	7.5	12.5
		2	1.5	609	347	1365	236	5.8	8.9
	2	1	1.9	476	521	1190	219	5.3	9.9
		2	1.8	542	293	945	234	4.0	7.3
RPH	1	1	1.2	893	418	1732	290	6.0	7.2
		2	1.1	838	506	1254	242	5.2	5.5
	2	1	1.6	752	590	1297	192	6.8	10.7
		2	1.4	787	629	1859	229	8.2	11.5

AUiv: agua útil al inicio de la ventana reproductiva; B: biomasa total aérea; DPV: déficit de presión de vapor; EUA_{B,T}: eficiencia en el uso del agua para producir biomasa basada en transpiración, EUA_{B,T/DPV}: EUAB,T corregida por DPV; RFAac: radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada; Pp: precipitaciones; R: riego; T: transpiración del cultivo

A través de sus dos primeros componentes, el ACP explicó un 80,9% de la variabilidad total de los datos, con un 47,3% explicado por el primer componente (CP1) y un 33,6% por el segundo (CP2, Figura 2). Los análisis efectuados separando al AUiv de la suma de lluvias y riego no mejoraron la predicción (CP1+CP2= 71,4%), pero sí permitieron establecer que el peso relativo de esa variable (largo del vector) era comparativamente pequeño respecto al resto, señal de una baja contribución relativa de la misma a la interpretación general (resultado no mostrado). Por otra parte, la exclusión del AUiv tampoco mejoró la predicción (CP1+CP2= 79,5%).

Para la opción de mayor capacidad explicativa del conjunto de datos (Figura 2), el CP1 distinguió claramente el ambiente húmedo y regado (RPH), hacia valores positivos del eje, de los ambientes subhúmedo (RSH) y semiárido (RSC) conducidos en secano, hacia valores negativos del eje. A su vez, sobre este eje tuvo lugar hacia valores positivos casi toda la variación detectada en biomasa, RFAac y disponibilidad hídrica (como suma de lluvias, riego y agua útil del suelo al inicio de la ventana reproductiva; Pp+R+AUiv), y hacia valores negativos toda la variación detectada en DPV. El ángulo agudo entre B, RFAac y disponibilidad hídrica denota una fuerte asociación positiva entre estas variables, mientras que el ángulo obtuso entre cualquiera de ellas y el DPV indica una asociación negativa. Así, los altos valores de biomasa producidos en la RPH se asociaron con ambientes de menor nivel de insaturación de la atmósfera y con una elevada capacidad para capturar luz, promovida por el mayor tamaño de canopeo que se pudo alcanzar gracias al riego (datos no mostrados). En contraposición, los ambientes de secano tuvieron siempre menor producción relativa de biomasa que la RPH (se ubicaron todos hacia la izquierda y la mayoría sobre la proyección negativa del vector). Los valores más negativos correspondieron siempre a la segunda campaña, en ambas épocas de siembra para la RSC y en la segunda época para la RSH, enfatizando el efecto negativo de la segunda fase consecutiva de La Niña en condiciones de secano y en contraposición con la alta productividad alcanzada en esa campaña con la segunda época de siembra en la RPH bajo



riego. El CP2 distinguió (i) la Camp1 (hacia valores negativos del eje) de la Camp2 (hacia valores positivos) para la RPH y la RSC, y (ii) la FS1 (hacia valores positivos) de la FS2 (hacia valores negativos) para la RSH. Sobre este eje tuvo lugar casi toda la variación detectada en transpiración (T) y ambas EUA (i.e. con y sin corrección por DPV), que guardaron entre si un ángulo de casi 180°, indicativo de una relación totalmente negativa entre la primera y las segundas. La variación en $EUA_{B,T}$, guardando una asociación positiva moderada con la biomasa (ángulo agudo), desapareció (ángulo recto) al ser corregida por el DPV ($EUA_{B,T/DPV}$). Por el contrario, la corrección fortaleció el efecto negativo de la T sobre la EUA.

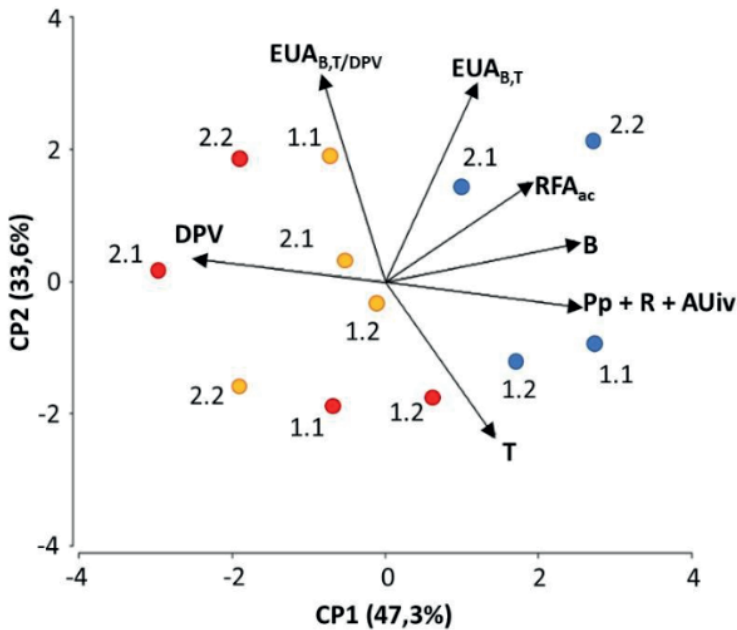


Figura 2. Biplot para los dos primeros componentes principales (CP) correspondientes a cultivos de maíz creciendo en tres ambientes (RSC: círculos rojos; RSH: círculos naranjas; RPH: círculos azules), en dos campañas (primer número cercano a cada símbolo) y dos fechas de siembra (segundo número cercano a cada símbolo). Los vectores corresponden a las variables biomasa total aérea (B), déficit de presión de vapor (DPV), eficiencia en el uso del agua para producir biomasa basada en transpiración ($EUA_{B,T}$), $EUA_{B,T}$ corregida por DPV ($EUA_{B,T/DPV}$), disponibilidad hídrica como suma de las precipitaciones, el riego y el agua útil del suelo ($Pp+R+AUiv$), radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFA_{ac}) y transpiración del cultivo (T), todas correspondientes a la ventana reproductiva.

Conclusión

Los resultados obtenidos enfatizan la importancia del ambiente sobre la productividad del agua, particularmente de la variación en la demanda evaporativa (DPV) y la oferta hídrica (Riego vs Secano). Así, las diferencias entre regiones (i.e. condiciones edafoclimáticas generales, principalmente la oferta de agua por lluvia+riego) determinaron la mayor (RPH) o menor (RSC y RSH) capacidad de producir B. Dicha capacidad estuvo en fuerte contraposición con la demanda evaporativa del ambiente (DPV), pero sólo en asociación levemente positiva con la capacidad de satisfacer esa demanda (T) y de producir biomasa por unidad de agua transpirada ($EUA_{B,T}$). Al ser corregida por el DPV ($EUA_{B,T/DPV}$), esta relación de la EUA con la biomasa desapareció totalmente y se fortaleció el efecto negativo de la transpiración sobre la EUA. Las condiciones de crecimiento de cada campaña (principalmente en RPH y RSC) y la época de siembra (principalmente en RSH) afectaron fuertemente a la T y las EUAs.



Referencias bibliográficas

Abbate PE, Dardanelli JL, Cantarero MG. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Sci* 44:474–483. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0474>

Andrade JF, Satorre EH. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *F Crop Res* 177:137–147. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.008>

Caviglia OP, Sadras VO, Andrade FH. 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *F Crop Res* 149:300–311. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.003>

Dardanelli, J., Collino, D., Otegui, M.E. y Sadras, V.O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: Satorre, E., Benech-Arnold, R., Slafer, G.A., de la Fuente, E., Miralles, D., Otegui, M.E., y Savín, R. (eds), 'Producción de Cultivos de Granos. Bases Funcionales para su Manejo'. Editorial Facultad de Agronomía. pp. 377-442.

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG. 2011. InfoStat.

Kemanian AR, Stöckle CO, Huggins DR. 2005. Transpiration-use efficiency of barley. *Agric For Meteorol* 130:1–11. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2005.01.003>

Lobell DB, Hammer GL, McLean G. 2013. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nat Clim Chang* 3:497–501. <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>

NOAA, 2022. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service. www.cpc.ncep.noaa.gov.

Nobel P, Jordan P. 1983. Transpiration Stream of Desert Species: Resistances and Capacitances for a C3, a C4, and a CAM Plant. *J Exp Bot*.

Ritchie JT. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour Res* 8:1204–1213. <https://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>

Ritchie S, Hanway J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Ext Serv Rep Iowa

Sinclair TR, Tanner CB, Bennett JM. 1984. Water-Use Efficiency in Crop Production

Villalobos FJ, Fereres E. 1990. Evaporation Measurements beneath Corn, Cotton, and Sunflower Canopies. *AgronJ* 82:1153. <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200060026x>