

EFFECTOS DEL ESTRÉS COMBINADO DE ALTA TEMPERATURA Y DEFICIENCIA DE AGUA EN LA FLORACIÓN FEMENINA, MASCULINA Y EL NÚMERO DE GRANOS EN MAÍZ.

Boscarino, S.^{1,2}; Neiff, N.¹; Namtz, Y.¹; Nalli Sonzogni, F. D.^{1,2}; Kettler, B. A.^{1,2}; Echarte, L.^{2,3,4}

¹ Centro de Ecofisiología Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste (FCA-UNNE), Corrientes, Argentina.

² Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

³ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Balcarce, Argentina.

⁴ Departamento de Introducción a las Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar Del Plata, Mar del Plata, Argentina

*E-mail: sebaboscarino@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Las temperaturas extremadamente altas y el déficit hídrico comúnmente afectan la productividad de los cultivos en el mundo (Prasad et al., 2008; Lobell et al., 2013). La frecuencia de estos eventos puede aumentar como resultado del calentamiento global (Rezaei et al., 2015; IPCC, 2023; Heino et al., 2023) impactando en mayor medida en latitudes bajas con alta probabilidad de golpes de calor durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Easterling et al., 1997). Feng et al. (2020), en un análisis global, determinaron que Argentina se encuentra dentro de los siete países productores que presentan una mayor probabilidad de ocurrencia de eventos con altas temperaturas y déficit hídrico. Así, el aumento de la frecuencia y la magnitud del estrés térmico (ET) por alta temperatura y déficit hídrico (DH) son unas de las principales limitantes abióticas con efectos adversos considerables en el rendimiento de maíz (Lobell y Field, 2007; Hatfield et al., 2011).

El número de granos (NG) es el componente que explica en mayor medida las variaciones en rendimiento de maíz (Tollenaar et al., 1992). El momento más crítico para la determinación del NG en maíz es alrededor de su floración (e.g., Tollenaar et al., 1992; Carrera et al., 2023). En particular se demostró que los efectos del ET sobre la reducción en NG fueron mayores entre la emisión de estigmas y 15-17 días posteriores a la misma (Rattalino Edreira y Otegui, 2013; Neiff et al., 2016; Shim et al., 2017), coincidente con el periodo de máxima susceptibilidad al DH (Ouattar et al., 1987).

Tanto la ocurrencia de ET o DH a menudo producen el desfase entre el intervalo antesis-estigmas (Cairns et al., 2013; Trachsel et al., 2016; Wang et al. 2019), lo cual conlleva a disminuciones del NG. Episodios de ET a menudo reducen el periodo de liberación de polen (PLP) y su producción diaria (Wang, 2019), como así también el

% de granos de polen viables (Alam et al., 2017). Además, se han reportado reducciones del número total de flores pistiladas y disminuciones de estigmas exertos por fuera de las chalas atribuibles a episodios de ET con diferencias genotípicas (Rattalino Edreira et al. 2011; Liu et al., 2020). A menudo, los genotipos con germoplasma tropical han presentado una mayor tolerancia al ET (Rattalino Edreira y Otegui, 2012; Mayer et al., 2016) que los híbridos templados. Sin embargo, gran parte de los híbridos sembrados en el Nordeste Argentino poseen genética de origen templada.

Por su parte, el DH durante el PC también produce importantes reducciones en el NG como consecuencia del retraso en la emergencia de los estigmas y el fallo en el cuaje de los granos (i.e., aborto; Westgate y Boyer, 1986; Bassetti y Westgate, 1993). La principal causa de aborto de granos ocurre por la escasez de asimilados hacia los ovarios fecundados (Westgate y Boyer 1986; McLaughlin y Boyer, 2004) que son resultado de las bajas tasas de crecimiento (Andrade et al., 2002; Nagore et al., 2017). Más aún, la aparición y el número total de estigmas y su relación con el porcentaje de cuaje fueron estudiados para estreses individuales por ET (Rattalino et al., 2011), DH (Otegui et al., 1995) y nitrógeno (Rossini et al., 2020), no existiendo estudios a campo que proporcionen información bajo ET*DH y que contrasten genotipos de distinto origen (templado vs. subtropical).

La mayoría de los estudios en maíz se han centrado en los efectos del ET y DH como factores de estrés individuales. Sin embargo, varios estudios revelan que los efectos combinados del ET*DH reducen en mayor medida el rendimiento del cultivo maíz respecto a estreses individuales (Neiff et al., 2015; Meseka et al., 2018; Hussain et al., 2019; Nelimor et al., 2019). Además, la tolerancia de híbridos de maíz a estreses individuales no confirió tolerancia al ET*DH combinado (Mittler et al.,

2006; Cairns et al., 2013). Por lo tanto, y considerando la escasez de estudios en condiciones de campo que combinen la incidencia de ET*DH y que contrasten genotipos de distinto origen, este trabajo tiene como objetivos: (i) caracterizar la floración masculina (período de liberación, producción y viabilidad de polen) y femenina (número de estigmas totales y exertos), (ii) cuantificar el intervalo antesis-emisión estigmas y (iii) establecer el impacto en el número de granos y su relación con las variables mencionadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo durante la campaña 2022/23 en el Campo Didáctico Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste (FCA-UNNE, Corrientes Capital 27° 28' S; 58° 49' O; 70 msnm). El cultivo se condujo sin limitaciones nutricionales, controlándose plagas, malezas y enfermedades. Se emplearon dos fechas de siembra (FS) para aumentar o reducir las probabilidades de ET (Iqbal et al., 2017) como así también modificar la oferta hídrica (Sinclair et al., 1990). De esta manera una FS fue sembrada a la salida del invierno (FS1: 22 y 23/08/2022) y la otra FS a mitad de la primavera (FS2: 8 y 9/10/2022). Las diferencias entre siembras para FS1 y FS2 se realizaron para sincronizar las fechas de floración de dos híbridos simples de origen subtropical (St; DK7702 VT3Pro) y templado (Te; DK7270 VT3Pro).

El diseño experimental fue de parcelas divididas en bloques completos con tres repeticiones para cada FS. La condición hídrica fue asignada a la parcela principal y los híbridos a las subparcelas. La parcela principal consistió de dos tratamientos hídricos por medio de riego por goteo: (i) sin limitantes hídricas con reposición del agua en el suelo que permita la evapotranspiración máxima (BR; "bien regado") y (ii) con disminución del aporte de riego al 50% respecto al no limitado (RH; restricción hídrica), desde V12 (Ritchie et al., 1993) hasta madurez fisiológica (MF). En el tratamiento BR se comprobó que el contenido hídrico en BR se mantuvo por encima del 50% de la capacidad de campo al menos en los primeros 25 cm de suelo, mediante el monitoreo diario del contenido de humedad volumétrico del suelo (cm^3/cm^3 , GS1, Decagon Devices). Se empleó una densidad única de 6,6 plantas m^{-2} con una distancia entre líneas de 0,5 m.

Variables respuesta

Los datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (mm) con una frecuencia de 10 minutos fueron provistos por una estación meteorológica automática ubicada a 50 m del experimento. Se cuantificó la sumatoria de $^{\circ}\text{C}$ por encima de 35°C durante el PC para el NG, representando la

acumulación de temperaturas estresantes (ATE; Cicchino et. al., 2010; Mayer et al., 2016):

$$\text{ATE} = \sum_1^N T_i > T_u$$

Donde: N es la duración del periodo (en horas), $T_i > T_u$ representa la acumulación de temperatura por encima de una temperatura umbral ($T_u = 35^{\circ}\text{C}$; Commuri y Jones, 2001).

El periodo de liberación de polen (PLP, d) se cuantificó a partir de la diferencia entre la fecha de antesis y el fin de liberación de polen. La producción de polen acumulada (PP, mg polen) se cuantificó durante cinco días desde antesis por medio de la recolección diaria en cinco plantas por subparcela utilizando un cono recolector colocado en cada panoja (Wang et al., 2019). El polen se recogió diariamente entre las 17 y 19 h para luego ser pesado en una balanza de precisión, con previa separación de las anteras y residuos. La viabilidad de polen (VP; %) se determinó al tercer día de iniciada la antesis en dos panojas por subparcela. Las panojas se cubrieron por la mañana entre las 7:30 y 8:00 h con bolsas de papel Kraft, que luego de dos horas se retiraron para llevarlas rápidamente al laboratorio. Una alícuota de polen fue depositado en una placa de Petri con un medio de cultivo líquido (Alam et al., 2017). Luego de transcurridas dos horas a 25°C se procedió a cuantificar 50 granos de polen de cada muestra por medio de un microscopio óptico ($\times 10$ aumentos), considerando viables aquellos granos cuyo tubo polínico superó la longitud del diámetro del grano de polen (Martins et al., 2016).

El intervalo antesis-emisión de estigmas (ASI; d) se calculó en cada subparcela como la diferencia, en días, entre la fecha de emisión de estigmas receptivos (R1) y la antesis. En R1 se identificaron cuatro plantas en cada subparcela, las cuales fueron etiquetadas y cubiertas con un sobre de papel para evitar la polinización-fecundación. Al quinto día de R1 (Cárcova et al., 2000) se determinó: (i) el número de estigmas exertos por espiga y (ii) el número total de estigmas por espiga (Parco et al., 2022). El número de granos a MF se obtuvo del promedio de las plantas del muestreo a cosecha, asumiendo similitud entre las plantas muestreadas a los cinco días de R1 y aquellas muestreadas a MF (i.e., estigmas exertos y cosecha, respectivamente).

Análisis estadístico

Por medio de un modelo lineal se empleó el análisis de la variancia (ANAVA) y análisis de correlación de Pearson. Además, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) considerando tanto los tratamientos, híbridos y las fechas de siembra. Este enfoque permitió examinar la contribución relativa de cada componente a la variabilidad observada en los datos. Al integrar tanto las fechas de siembra, la condición hídrica y los híbridos en el ACP, se pudo evaluar la importancia relativa de cada uno en la variabilidad total de los datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El atraso en la FS condujo a una mayor acumulación de temperaturas estresantes (ATE) durante el PC para FS2 (341,9°C h⁻¹) comparado con FS1 (17,5°C h⁻¹). Valores similares de ATE fueron alcanzados en ensayos con incrementos térmicos mediante cobertura plástica, durante 15 días en pre y/o post-floración de maíz (467, 152 y 166,4°C h⁻¹ para Cicchino et al. 2010, Rattalino Edreira et al., 2011; Neiff et al., 2016; promedio entre campañas y momentos). Es así que, durante el PC para NG, FS1 y FS2 se caracterizaron por moderado y elevado ET, respectivamente. El acumulado de precipitaciones durante el PC fue de 73,8 (FS1) y 55 mm (FS2). Los aportes de riego en este periodo fueron 110,7 y 154,4 mm en las parcelas bien regadas (BR) para FS1 y FS2, respectivamente. En las parcelas con restricción hídrica (RH) se alcanzó una reducción del 47,4 y 53,0% del acumulado de precipitaciones + riego para FS1 y FS2, respectivamente. Dado la baja retención hídrica por las características edáficas, las parcelas con RH presentaron

DH en ambas FS junto con ET moderado o elevado (FS1 y 2, respectivamente).

En FS1 (caracterizada por ET moderado), el NG m⁻² fue significativamente afectado por la condición hídrica (p<0.01) y el híbrido (p<0.05). El híbrido Te tuvo mayor NG m⁻² respecto a St (7.0 y 11.6% para BR y RH, respectivamente; Tabla 1). No obstante, en FS2 (ET elevado) existió una interacción significativa (p<0.01) para condición hídrica*híbrido; mientras el híbrido St tuvo menor NG en las parcelas BR comparado con el híbrido Te (-559 granos m⁻²; **Tabla 1**), St tuvo un mejor desempeño en las parcelas con RH (+693 granos m⁻²). De esta manera, el NG m⁻² en la combinación ET*DH (i.e., FS2-RH) se redujo 31% respecto a la condición de ET elevado (FS2-BR), en promedio de los dos híbridos. Esta diferencia porcentual se encuentra dentro del rango explorado para ET en híbridos de genética contrastante (-11,2 a -45,5%; Neiff et al., 2016) o DH en un híbrido de reciente liberación (-15,0 a -31,0%; Nagore et al., 2017).

Tabla 1. Número de granos (NG), viabilidad de polen (VP), producción de polen acumulada (PP), periodo de liberación de polen (PLP), intervalo anthesis-estigmas (ASI), estigmas totales y estigmas excertos en maíz sembrado en dos fechas de siembra con distinta probabilidad de estrés térmico. Las fuentes de variación fueron dos condiciones hídricas (BR, bien regado; RH, restricción hídrica) y dos híbridos de origen contrastante (St, subtropical; Te, Templado).

Fecha de siembra 1								
Condición	Híbrido	NG	VP	PP	PLP	ASI	Estigmas totales	Estigmas excertos
		m ⁻²	%	mg 5d ⁻¹	d	d	pl-1	pl-1
BR	St	3505	59,4	0,92	4,9	-1	568	483
	Te	3769	54,6	0,73	4,8	2,5	642	487
RH	St	2957	31,7	0,61	4,4	1	586	476
	Te	3346	28,6	0,46	5,2	2,2	586	428
Condición		**	*	*	ns	ns	ns	*
Híbrido		*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Condición × Híbrido		ns	ns	ns	ns	*	*	ns
Fecha de siembra 2								
BR	St	3320	51,7	0,76	4,9	0,2	591	513
	Te	3881	55,7	0,75	5	0,8	724	641
RH	St	2818	42,5	0,63	5,1	0,7	581	493
	Te	2125	16	0,64	4,8	2,7	583	492
Condición		***	**	ns	ns	ns	***	**
Híbrido		ns	ns	ns	*	*	***	***
Condición × Híbrido		**	ns	ns	**	ns	***	***

ns, no significativo

***, **, *, significativo para p-valor ≤ 0.001, 0.01, y 0.05, respectivamente

El número de granos m^{-2} estuvo asociado de manera significativa ($p < 0.05$) con la viabilidad de polen (VP; $r = 0.65$ y 0.81 para FS1 y FS2, respectivamente; promedio

entre híbridos), no así para la producción de polen (PP; $r = 0,27$ y $0,31$) y el PLP ($r = 0.32$ y $0,41$). Incluso, en las parcelas BR la VP no superó el 60% en ninguna FS (**Tabla 1**). Esto pudo estar asociado a que las temperaturas en ambas FS superaron de manera sostenida los $32^{\circ}C$, temperatura a la cual ocurren daños en el polen (Herrero y Johnson, 1980; Schoper et al., 1987). El híbrido St presentó mayor VP en las parcelas con RH (+3.1 y +26.5% para FS1 y FS2, respectivamente) y un aumento significativo de la PP en FS1 (+26.0 y +32.6 mg polen) respecto del híbrido Te. El PLP rondó los 5 días y no cambió significativamente ($p > 0.05$) bajo ninguna condición hídrica o híbrido empleado (Tabla 1) en concordancia con Wang et al. (2019). Por otra parte, y a pesar de no existir diferencias significativas en la variable ASI para condición hídrica, el híbrido St presentó menor ASI ($p < 0.05$) respecto al híbrido Te en FS2. Estos resultados discrepan de otros trabajos que documentan aumentos en ASI bajo ET (Rattalino, Edreira et al., 2011; Alam et al., 2017) o

ET*DH (Cairns et al., 2013; Neiff et al., 2015) en post-floración de maíz, posiblemente por mejoras para este rasgo en híbridos comerciales actuales.

A diferencia de VP, PP y PLP, el NG m^{-2} estuvo significativamente asociado ($p < 0.05$) sólo para FS2 con el ASI ($r = -0.6$), los estigmas totales (0.66) y exertos (0.67). Las parcelas con RH redujeron de manera significativa los estigmas exertos en ambas FS (**Tabla 1**). El mayor número de estigmas exertos en el híbrido Te en las parcelas BR y similar en RH comparado con St (+128 pl^{-1} y -1 pl^{-1} , respectivamente), condujo a una interacción significativa condición hídrica x híbrido en FS2 (**Tabla 1**).

En el ACP, los componentes principales 1 y 2 en el biplot explicaron el 70,9% de la variabilidad total de los datos (Figura 1). El componente principal 1 separó las parcelas BR de aquellas con RH para ambas FS. De esta manera el NG m^{-2} se asoció positivamente con PP, PV, estigmas totales y exertos orientándose los vectores de estas variables hacia las parcelas BR (**Figura 1**). En el plano opuesto determinado por las dos componentes principales, las parcelas del híbrido Te se orientaron hacia los vectores de las variables ASI, PLP, estigmas totales y exertos.

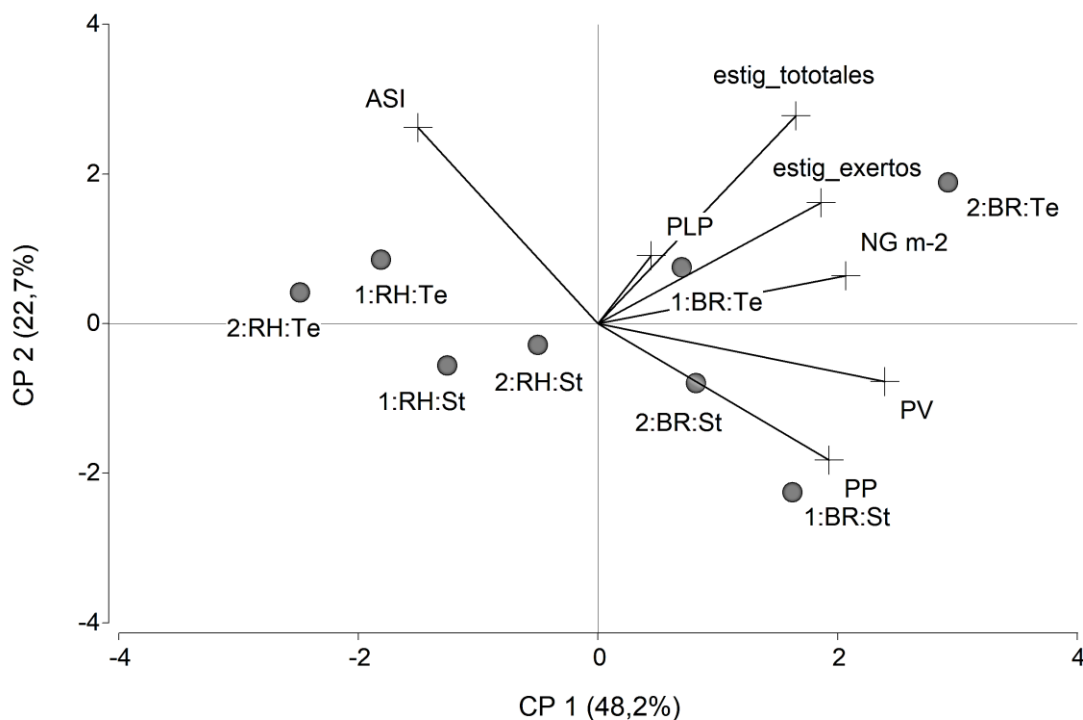


Figura 1: Biplot del primer y segundo componente principal (CP) del análisis de componentes principales indicando asociaciones (+) entre el NG m^{-2} y variables asociadas con la dinámica de las floraciones masculina y femenina en maíz expuesto a dos fechas de siembra (1 y 2), dos condiciones hídricas (BR y RH para bien regado y restricción hídrica, respectivamente) y dos híbridos de origen contrastante (St, subtropical; Te, Templado). VP, PP y PLP corresponden a viabilidad, producción acumulada y periodo de liberación de polen. El intervalo antesis-estigmas (ASI), estigmas (estig_) totales y exertos fueron determinados.

Conclusiones

En condiciones de estrés térmico moderado, el NG del híbrido Te es mayor que el St en ambas condiciones

hídricas exploradas (i.e., BR y RH). En condiciones de elevado estrés térmico, el NG fue similar entre los híbridos

en condiciones bien regadas, pero el híbrido Te redujo en mayor medida su NG al limitarse la disponibilidad de agua (FS2-RH). Por lo tanto, el híbrido subtropical presentaría ventajas en condiciones de alto estrés térmico combinado con deficiencia hídrica asociado a mayores valores de viabilidad y producción de polen junto a una menor reducción en los estigmas exertos y una mayor sincronía floral.

BIBLIOGRAFÍA

- Alam MA, Seetharam K, Zaidi PH, et al (2017) *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.006>
- Andrade FH, Echarte L, Rizzalli R, et al (2002) *Crop Science*. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1173>
- Bassetti, P., & Westgate, M. E. (1993). *Crop Science* <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300020011x>
- Cairns JE, Crossa J, Zaidi PH, et al (2013) *Crop Science* <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.09.0545>
- Cárcova, J., Uribe Larrea, M., Borrás, L., Otegui, M. E., & Westgate, M. E. (2000). <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.4041056x>
- Carrera, C. S., Savin, R., & Slafer, G. A. (2023). *Trends in Plant Science*. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.08.012>
- Cicchino M, Edreira JIR, Otegui ME (2010a) *Crop Science* <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.07.0400>
- Commuri, P. D., & Jones, R. J. (2001). *Crop Science*. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.4141122x>
- Easterling DR, Horton B, Jones PD, et al (1997) *Science* <https://doi.org/10.1126/science.277.5324.364>
- Feng, S., & Hao, Z. (2020). *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135250>
- Fonseca, A. E., & Westgate, M. E. (2005). *Field crops research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.12.001>
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., & Wolfe, D. (2011). *Agronomy journal*. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
- Heino, M., Kinnunen, P., Anderson, W., Ray, D. K., Puma, M. J., Varis, O., & Kumm, M. (2023). *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29378-2>
- Herrero, M. P., & Johnson, R. R. (1980). *Crop science*. <https://doi.org/10.2135/cropsci1980.0011183X002000060030x>
- Hussain, H. A., Men, S., Hussain, S., Chen, Y., Ali, S., Zhang, S., & Wang, L. (2019). *Scientific reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40362-7>
- IPCC Climate Change: Summary for Policymakers. In: *Climate Change (2023): Synthesis Report*.
- Iqbal, M., Ul-Allah, S., Naeem, M., Ijaz, M., Sattar, A., & Sher, A. (2017). *Euphytica*. <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1916-2>
- Liu, X., Wang, X., Wang, X., Gao, J., Luo, N., Meng, Q., & Wang, P. (2020). *Environmental and Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104213>
- Lobell, D. B., & Field, C. B. 2007. *Environmental research letters*. 10.1088/1748-9326/2/1/014002
- Lobell DB, Hammer GL, McLean G, et al (2013) *Nature Climate Change* <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>
- Martins, E. S., Davide, L. M. C., Miranda, G. J., Barizon, J. D. O., Souza, F. D. A., Carvalho, R. P. D., & Gonçalves, M. C. (2016). *Ciencia Rural*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002>
- Mayer, L. I., Savin, R., & Maddonni, G. A. (2016). *Crop Science*. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.09.0537>
- McLaughlin, J. E. & Boyer, J. S. (2004). *Annals of Botany*. <https://doi.org/10.1093/aob/mch193>
- Meseka, S., Menkir, A., Bossey, B., & Mengesha, W. (2018). *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy8120274>
- Mittler, R. (2006). *Trends in plant science*. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.11.002>
- Nagore, M. L., Della Maggiora, A., Andrade, F. H., & Echarte, L. (2017). *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.013>
- Neiff N, Dhliwayo T, Suarez EA, et al (2015) *Journal of Crop Improvement*. <https://doi.org/10.1080/15427528.2015.1073643>
- Neiff N, Trachsel S, Valentinuz OR, et al (2016) *Crop Science* <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.12.0755>
- Nelimor, C., Badu-Apraku, B., Tetteh, A. Y., & N'guetta, A. S. (2019). *Plants*. <https://doi.org/10.3390/plants8110518>
- Otegui, M. E., Andrade, F. H. & Suero, E. E. (1995). *Field Crops*. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00093-R](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00093-R)
- Ouattar, S., Jones, R. J. & Crookston, R. K. (1987). *Crop Science*. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00093-R](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00093-R)
- Parco, M., D'Andrea, K. E. & Maddonni, G. Á. (2022). *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108553>
- Prasad PVV, Staggenborg SA, Ristic Z, et al (2008) In: *Adv. in Agr. Sys. Modeling*. American Society of Agronomy, CSSA, SSSA.
- Rattalino Edreira, J. I., Budakli Carpici, E., Sammarro, D. & Otegui, M. E. (2011). *Field Crops* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.015>

- Rattalino Edreira, J. I., & Otegui, M. E. (2012). *Field Crops*.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.009>
- Rattalino Edreira, J. I., & Otegui, M. E. (2013). *Field Crops*.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.009>
- Rezaei, E. E., Webber, H., Gaiser, T., Naab, J., & Ewert, F. (2015). *European Journal of Agronomy*.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.10.003>
- Ritchie, S. W., Hanway, J. J., Benson, G. O., Herman, J. C., & Lupkes, S. J. (1993). *State Univ. Coop. Ext. Serv., Ames*. 3. <https://doi.org/10.1104/pp.104.900138>
- Rossini, M. A., Hisse, I. R., Otegui, M. E., & D'Andrea, K. E. (2020). *Crop Science*.
<https://doi.org/10.1002/csc2.20123>
- Schooper, J. B., Lambert, R. J., & Vasilas, B. L. (1987). *Crop science*.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1987.0011183X002700010007x>
- Shim, D., Lee, K. J., & Lee, B. W. (2017). *The Crop Journal*.
<https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.01.004>
- Sinclair, T. R., Bennett, J. M. & Muchow, R. C. (1990). *Crop Science*.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X00300030043x>
- Trachsel S, Sun D, SanVicente FM, et al (2016) *PLOS ONE* 11:e0149636.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149636>
- Tollenaar, M., Dwyer, L. M., & Stewart, D. W. (1992). *Crop Science*.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200020030x>
- Wang, Y., Tao, H., Tian, B., Sheng, D., Xu, C., Zhou, H., Shoubing, H., & Wang, P. (2019). *Environmental and Experimental Botany*.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.007>
- Westgate, M. E., & Boyer, J. S. (1986). *Crop Science*.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1986.0011183X002600050023x>