

## **Altas temperaturas y déficit hídrico en maíz: respuestas fisiológicas y estrategias de manejo del cultivo**

Gustavo Ángel Maddonni y Robinson Andrey Navarrete Sánchez  
Cátedra de Cerealicultura (FA-UBA) e IFEVA (CONICET)

### **1. Introducción**

El área mundial de siembra del cultivo de maíz, abarca un amplio rango de latitudes, desde los 58° N en Canadá hasta los 40° S en Argentina y Chile (Fischer *et al.*, 2014). Las principales regiones donde se produce este cultivo presentan temperaturas promedio para la estación de crecimiento que varían entre 13°C y 32° C mientras que el rango de precipitaciones promedio anual es de 500 mm a 2000 mm (Bunting *et al.*, 1982). Dentro de esta variabilidad climática, el maíz es cultivado desde ambientes tropicales con pocas variaciones en la duración del día (*i.e.* fotoperíodo) durante su ciclo, hasta zonas templadas o templado frías con fotoperíodos largos y variables (*i.e.* más allá de los 34° S y N) (Paliwal, *et al.*, 2001). Consecuentemente, existen mecanismos adaptativos en esta especie que le permite crecer, desarrollarse y alcanzar rendimientos económicamente rentables en un amplio rango de condiciones foto-termales.

La mayor proporción de la producción mundial de maíz (ca. 74%) se realiza en seco (Biradar *et al.*, 2009). Por tanto, en estos sistemas la productividad anual es función de la oferta de agua. Sin embargo, otros factores ambientales también pueden incidir sobre la productividad del cultivo. Un análisis retrospectivo de los rendimientos de maíz alcanzados en regiones agrícolas de África (Lobell *et al.*, 2011) y Estados Unidos (Lobell *et al.*, 2013) permitió identificar los efectos negativos de los incrementos de la temperatura

media durante la estación de crecimiento sobre el rendimiento del maíz, especialmente en los maíces de secano. Estos escenarios combinados de incrementos de temperatura y restricciones hídricas probablemente se vean agravados en los próximos años por efectos del cambio climático global (IPCC, 2014). En áreas de Latinoamérica en particular, se espera la ocurrencia de episodios de estrés térmico y eventos hídricos extremos como sequías intensas, que afectarían negativamente los rendimientos de los cultivos estivales (Lobell *et al.*, 2008).

La producción de maíz en Argentina, tradicionalmente se realizaba en la Pampa Ondulada (32° a 35.8° S y 58°62'O) (Hall *et al.*, 1992). Esta zona presenta el menor número de limitaciones climáticas para la agricultura extensiva (temperatura media anual de 16 °C, período libre de heladas de 240 días y 950 mm de precipitaciones anuales). Sin embargo, debido a la adopción masiva del cultivo de soja, parte de la producción de maíz se ha desplazado hacia áreas de tradición ganadera, por ejemplo, al oeste y al sur-oeste de la Pampa Ondulada, es decir la Pampa Interior (Soriano, 1991). Del mismo modo, la frontera agrícola se ha desplazado hacia el norte de la Pampa Ondulada a partir de la deforestación de los bosques nativos (Dirección de Bosques, 2007). Por lo tanto, la producción del cultivo del maíz se ha expandido por fuera de la zona templado-húmeda, permitiendo el mantenimiento de la superficie nacional ocupada anualmente con este cultivo ante su desplazamiento por el cultivo de soja, pero exponiéndolo a ambientes semiáridos (< 700 mm anuales) con mayor frecuencia de eventos de altas temperaturas y restricciones hídricas (Maddonni, 2012). Cambios en la fecha de siembra han permitido *mitigar* los efectos negativos del estrés hídrico estival sobre el rendimiento del maíz, ya sea adelantando (*i.e.*

fechas de siembra tempranas) o atrasando (*i.e.* fechas de siembra tardías) el período crítico de mayor susceptibilidad a la sequía (*i.e.* estrategia de *escape*), y ubicando las etapas post-floración (fecha temprana) o prefloración (fecha tardía) en la época del año de mayores registros térmicos (Maddoni, 2012). Así, en estos diversos escenarios productivos del país, la incidencia de elevados regímenes térmicos puede generar estrés por alta temperatura en diversas etapas del cultivo, y dependiendo de la zona y fecha de siembra puede también resultar en la ocurrencia simultánea de déficit hídrico. Por lo tanto, no sólo resulta de interés global sino también nacional poder interpretar el impacto del estrés térmico en combinación con el estrés hídrico en el cultivo de maíz, y nuestro grupo de trabajo es pionero en estos estudios, ya que ambos estreses siempre se han abordado en forma aislada (BoM, 2006).

## **2. Efectos individuales del estrés térmico en maíz**

En condiciones de campo, el maíz se adapta a las variaciones diarias de la temperatura, en un rango térmico que le permite su desarrollo y crecimiento (Bunting *et al.*, 1982). Sin embargo, también puede estar sometido a temperaturas extremadamente elevadas que exceden las temperaturas óptimas y que pueden resultar estresantes. Los niveles de daño ocasionados van a depender, al igual que para otros estreses, de la intensidad, la duración y del momento de ocurrencia del estrés. Se consideran temperaturas estresantes aquellos valores de temperaturas diurnas que superan el valor de óptimo de desarrollo (Warrington y Kanemasu, 1983; Ellis *et al.*, 1992), resultando estas temperaturas diferentes según el ambiente de selección (templados o tropicales) de los genotipos (Fischer *et al.*, 2014). Para genotipos de origen tropical, las temperaturas óptimas son mayores que

para los templados, e intermedios para las cruzas, variando el rango de temperatura óptima entre 30 y 34 °C (Gilmore y Rogers, 1958; Blacklow, 1972). Por encima de estos rangos y según el momento de ocurrencia, los efectos de altas temperaturas pueden afectar el desarrollo fenológico, el crecimiento, la generación del rendimiento, el peso de los granos, la composición química de los granos y la calidad industrial (Cicchino *et al.* 2010a, b; Rattalino *et al.*, 2011, 2012; 2014; Mayer, 2015; Mayer *et al.*, 2014; 2016; Wilhem *et al.* 1999).

Analizando en conjunto los trabajos mencionados, y al igual que para el estrés hídrico, el mayor impacto de un estrés térmico sobre el rendimiento se origina cuando el mismo tiene lugar alrededor de floración, ya que provoca fallas en la fijación de granos asociadas a la inviabilidad de los granos de polen, la alteración en las dinámicas de floración y el aborto de granos (Barnabás, 2008; Cicchino *et al.*, 2010b; Rattalino *et al.*, 2011). Con respecto al peso de los granos y su composición química, breves períodos de estrés térmico en post-floración causan un cese anticipado del llenado (Mayer *et al.*, 2014; Rattalino *et al.*, 2011) originando granos livianos, con menores porcentajes de aceite y mayores porcentajes de proteína (Mayer *et al.*, 2014; 2016a). El estrés térmico también genera cambios en la composición de los ácidos grasos del aceite del maíz, principalmente reduciendo el % de ácido oleico e incrementando el % de linoleico (Mayer *et al.*, 2016b), e incrementa la abundancia relativa de glutelinas,  $\beta$ - +  $\gamma$ -zeínas, a expensas de las  $\alpha$ -zeínas de las proteínas endospermáticas (Mayer, 2015). Con referencia a la calidad industrial, la incidencia de estrés térmico durante el llenado originó disminuciones de las fracciones de granos grandes (>8mm) e incrementos de las fracciones de granos medianos (8-6.5mm) y

pequeños (<6.5mm). Esto condujo a que los cultivos tuvieran granos con calibres alejados de las normas especificadas por la industria de la molienda seca y de aquellas elaboradoras de pochoclos. Sin embargo, el estrés por calor no alteró los parámetros de dureza (e.g., densidad, índice de flotación, peso hectolítrico, relación de molienda, rendimiento de grits) de los genotipos analizados (Mayer, 2015). Estos resultados, revelan el mayor grado de homeostasis de los atributos de calidad industrial respecto a aquellos asociados con el peso de los granos y su composición química ante la ocurrencia de episodios de calor extremo durante el período post-floración del maíz.

Además de los efectos directos sobre el rendimiento, el peso y la calidad de los granos, el estrés térmico impacta sobre el crecimiento del cultivo, pero a diferencia del estrés hídrico su mayor impacto se origina a través de la caída en la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) (Cicchino *et al.*, 2010b; Rattalino *et al.*, 2012), debido a la sensibilidad de la fotosíntesis como proceso a niveles de temperatura supra-óptimos (Wahid *et al.*, 2007; Neiff *et al.*, 2016) registrados en los cultivos a episodios de temperaturas extremadamente elevadas. Sin embargo tanto la fotosíntesis (Neiff *et al.*, 2016), como la EUR (Rattalino *et al.*, 2012; Navarrete Sánchez *et al.*, 2016) presentan una rápida recuperación luego del período de altas temperaturas, lo cual puede determinar que el crecimiento del cultivo durante el período crítico no limite la fijación de granos (Navarrete Sánchez *et al.*, 2016). Consecuentemente, el rendimiento sólo se verá afectado cuando el estrés térmico tiene lugar durante el período alrededor de la floración, principalmente inmediatamente después de la floración femenina, afectando el crecimiento de las plantas y la partición de asimilados hacia las espigas (Rattalino y Otegui, 2013).

### 3. Efectos conjuntos del estrés hídrico y el estrés térmico en maíz

En condiciones de campo el maíz está sometido a la interacción temporal y espacial de muchos factores, incluidos entre ellos las elevaciones de temperatura y las restricciones hídricas. Sin embargo el estudio de estos factores se ha hecho de forma individual, debido a la dificultad de reproducir dichos eventos en forma conjunta a campo. De los estudios de ambos factores en forma aislada, es posible vislumbrar algunos de los posibles efectos que podría originar la incidencia conjunta de estos estreses sobre el crecimiento del cultivo de maíz. Las altas temperaturas usualmente causan cierre estomático, como respuesta indirecta al efecto del incremento del déficit de presión de vapor (DPV) y al aumento en la concentración interna de CO<sub>2</sub> por elevación de la respiración (Lösch, 1979). Como consecuencia, el cese de la transpiración origina una elevación de la temperatura foliar que según la magnitud puede afectar a los procesos fotosintéticos. Los cultivos con adecuada provisión hídrica ante mayores DPV pueden regular la temperatura foliar por incrementos de la transpiración reduciendo la temperatura foliar hasta 8 °C por debajo de la temperatura del aire (Reynolds *et al.*, 1994). Por el contrario, en cultivos bajo condiciones de déficit hídrico un aumento en el DPV puede incrementar la temperatura foliar hasta 15 °C por encima de la temperatura del aire (Alschuler, 1982), resultando perjudicial para la funcionalidad del aparato fotosintético. Estas respuestas fisiológicas podrían ser la base del mayor impacto a campo del estrés térmico en maíz cuando ocurre conjuntamente con deficiencias hídricas (Çakir, R. 2004). En un estudio reciente (Navarrete Sánchez *et al.*, 2016), la incidencia conjunta de alta temperatura y estrés hídrico en la etapa previa al período crítico, determinó una mayor reducción (ca. 39.5%) en el crecimiento de los

cultivos de maíz que los estreses aislados (ca. 11%). Los efectos de los estreses principalmente sobre la EUR explicaron los cambios en la tasa de crecimiento y estuvieron asociados a la menor capacidad de disipación de la temperatura foliar de los cultivos sometidos a estrés hídrico. Luego del período de imposición de los estreses, la capacidad de recuperación de la EUR (i.e. resiliencia) durante el período crítico compensó total o parcialmente, los efectos tempranos, reflejándose en pocos cambios de la tasa de crecimiento alrededor de floración y en la fijación de granos. Futuros estudios deberían abordar esta misma metodología con la imposición de los estreses aislados y conjuntos durante el período crítico y el llenado de los granos.

#### **4. Estrategias de manejo en ambientes proclives a riesgo de déficit térmico y/o hídrico.**

Como se mencionara anteriormente existen dos estrategias para reducir o *mitigar* el impacto de un estrés sobre la producción de los cultivos: la *tolerancia* y el *escape* al estrés. Si bien existen algunas diferencias genotípicas en el grado de *tolerancia* de un material a la incidencia de estrés hídrico o térmico, sin duda la estrategia más generalizada es el *escape* al estrés. Para ello es necesario conocer la respuesta de la fenología de un genotipo al ambiente, y las características climáticas de una localidad para ubicar el período más crítico para la determinación del rendimiento antes o después de los momentos del año de mayor probabilidad de incidencia del estrés (Maddonni, 2012). En general, en la Región Pampeana argentina, siembras tempranas ubican la floración de los cultivos de maíz hacia mediados de Diciembre, evitando la sequía estacional de principios de Enero, pero durante Diciembre y Enero pueden ocurrir episodios de temperaturas extremadamente altas

afectando el número de granos (golpes de calor en Diciembre) y/o el peso y calidad de los granos (golpes de calor durante Enero). Por el contrario, fechas de siembra tardía sólo expondrían las etapas previas a floración a dichos estreses, y dependiendo de la capacidad de recuperación de los cultivos podrían no tener impacto sobre el rendimiento y su calidad.

## 5. Agradecimientos

Estos trabajos han sido financiados por Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO, Proyecto 8031) y la Universidad de Buenos Aires (UBACyT 20020130100335BA). G. A. Maddonni es investigador independiente de CONICET y R. A. Navarrete Sánchez es becario de CONICET.

## 6. Referencias

- Altschuler, M.,M. 1982. Heat shock proteins and the effect of heat shock in plants. *Plant Molecular Biology*, 1, 103–115.
- Barnabás, B., Jäger, K., y Fehér, A. 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell & Environment*, 31(1), 11–38.
- Biradar, C. M., Thenkabail, P. S., Noojipady, P., Li, Y., Dheeravath, V., Turrall, H., Velpuri, M., Gumma, M. K., Gangalakunta, O. R. P., Cai, X. L., Xiao, X., Schull, M. A., et al. 2009. A globalmap of rainfed cropland areas (GMRCA) at the endof the last millennium using remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.*, 11, 114–129.
- Blacklow, W. M. 1972. Influence of Temperature on Germination and Elongation of the Radicle and Shoot of Corn (*Zea mays* L.)1. *Crop Science*, 12(5), 647
- Bunting, A.H., Dennett, M.D., Elston, J., Speed, C.B. 1982. Climate and crop distribution. In: Blaxter, K.L., Fowden, L. (Eds.), *Food, nutrition and climate*. Applied Science Publishers, pp. 43-78.



- Cicchino, M., Edreira, J. I. R., Otegui, M. E. 2010a. Heat stress during late vegetative growth of maize: effects on phenology and assessment of optimum temperature. *Crop Science*, 50, 1431-1437.
- Cicchino, M., Edreira, J. I. R., Uribebarrea, M., Otegui, M. E. 2010b. Heat Stress in Field-Grown Maize: Response of Physiological Determinants of Grain Yield. *Crop Science*, 50, 1438-1448.
- Dirección de bosques. 2007. Informe sobre deforestación en Argentina. 10 pp.
- Ellis, R. H., Summerfield, R. J., Edmeades, G. O., y Roberts, E. H. 1992. Photoperiod, Temperature, and the Interval from Sowing to Tassel Initiation in Diverse Cultivars of Maize. *Crop Science*, 32, 1225-1232.
- Fischer, T., Byerlee, D., Edmeades, G. 2014. Crop yields and global food security; Will yield increase continue to feed the world? Ed. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR). 5, 183- 240.
- Gilmore, E. C., y Rogers, J. S. 1958. Heat Units as a Method of Measuring Maturity in Corn 1, 1-5.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghersa, C.M. Cullot, Ph. 1992. Field-Crop Systems of the Pampas. pp. 413-450. In: C.J. Pearson (ed.). *Ecosystems of the world. Field Crops Ecosystems*. Elsevier Scientific, Amsterdam.
- IPCC. 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 190 pp.
- Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., Naylor, R. L. 2008. Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science*, 319, 607-610.

- Lobell, D. B., Bänziger, M., Magorokosho, C., y Vivek, B. 2011. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature Climate Change*, 1, 42–45.
- Lobell, D. B., Hammer, G. L., McLean, G., Messina, C., Roberts, M. J. y Wolfram Schlenker. 2013. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climatic Change*, 3, 497-501.
- Maddonni, G. A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 325–345.
- Mayer, L.I. 2015. Estrés térmico y sus efectos sobre el peso y la calidad de los granos en maíces de diferente destino de producción. Tesis doctoral, Escuela para graduados FA-UBA.
- Mayer, L.I.; Izquierdo, N.G. y Maddonni G.A. 2016b. La composición de ácidos grasos del aceite de maíz y el estrés termico durante el llenado de los granos. XXXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal.
- Mayer, L.I.; Rattalino Edreida, J.I.; Maddonni, G. A. 2014. Oil yield components of maize crops exposed to heat stress during early and late grain-filling stages. *Crop Science* 54, 1-15.
- Mayer, L. I.; Savín, R.; Maddonni, G.A. 2016a. Heat Stress during Grain Filling Modified Kernel Protein Composition in Field-Grown Maize. *Crop Science*, 56 1-14.
- Navarrete Sánchez, R.A.; Tognetti, P.M.; Maddonni, G. A. 2016. Growth Resilience of Tropical Maize Hybrids after Episodes of Extremely High Temperatures and Water Deficit Imposed during Vegetative Stages. *Crop Science*, en revisión.
- Neiff N., Trachsel S., Valentinuz O.R., Balbi C.N., Andrade F.H. 2016. High Temperatures around Flowering in Maize: Effects on Photosynthesis and Grain Yield in Three Genotypes. *Crop Science*, 56, 1-11.
- Paliwal, R.; Granados, G.; Lafitte, H.; Violic, A. 2001. El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma.

- Rattalino Edreira, J.I., Budakli Carpici, E., Sammarro, D., Otegui, M.E. 2011. Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Research*, 123, 62–73.
- Rattalino Edreira, J.I., Otegui, M.E. 2012. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. *Field Crops Research* 130, 87-98.
- Rattalino Edreira, J.I., Otegui, M.E. 2013. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: A novel approach for assessing sources of kernel loss in field conditions. *Field Crops Research*, 142, 58-67.
- Rattalino Edreira, J. I., Mayer, L.I.; Otegui, M. E. 2014. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Kernel growth, water relations and assimilate availability for grain filling. *Field Crops Research*, 166, 162-172.
- Reynolds, M. P., Balota, M., Delgado, M. I. B., Amani, I., Fischer, R. A. 1994. Physiological and morphological traits associated with spring wheat yield under hot, irrigated conditions. *Australian Journal of Plant Physiology*, 21, 717–730.
- Soriano, A. 1991. Río de la Plata grasslands. pp. 367-407. In: R.T. Coupland (ed.). *Ecosystems of the world. Natural grasslands*. Elsevier Scientific, Amsterdam.
- Dirección de bosques, 2007. Informe sobre deforestación en Argentina. 10 pp.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., Foolad, M.R., Khair, A. 2007. Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany* 61, 199-223.
- Warrington. I.J., Kanemasu, E. T. 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod. I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agronomy Journal*, 75, 749–754.
- Wilhelm E.P., Mullen R.E., Keeling P.L., Singletary G.W. 1999. Heat stress during grain filling in maize: effects of kernel growth and metabolism. *Crop Science*, 39, pp. 1733–1741.