HELADAS Y FRÍO SUBLETAL EN EL LLENADO DE GRANOS DEL CULTIVO DE MAÍZ

Poza, J.[1]; Roncayoli, T.[1]; Lewczuk, N.[2,3]; Muñoz, S.[2]; Echarte, L.[2,3]

[1] Colegio San José, Balcarce.
[2] IPADS (CONICET-EEA INTA Balcarce)
[3] Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP

FROST AND SUB-LETHAL COLD DURING MAIZE GRAIN FILLING

Abstract

Predicting cold damage in maize from weather station data faces unresolved limitations: the relationship between frost or sub-lethal cold and the cessation of grain filling is poorly quantified, and the thermal environment within the canopy has not been characterized. Three maize hybrids (RM99, RM105, RM120) from a late sowing date (January 27, 2026) were evaluated in Balcarce, Argentina, with temperature sensors at three heights within the canopy. Cessation of grain growth was determined by both a bilinear fit and the appearance of the black layer. Maximum grain weight was lower than expected for timely sowing dates, and grain moisture content at cessation exceeded the value typically reached at physiological maturity, indicating that grain filling was interrupted prematurely. The bilinear fit placed cessation before frost occurred throughout the entire canopy profile, associated with loss of green leaf area and sub-lethal cold; black layer appearance occurred simultaneously across the three genotypes, following extreme frost events. The weather station systematically underestimated frost occurrence relative to the canopy, whose vertical thermal profile differed from the classical pattern observed in a meteorological shelter, which challenges the use of the station-based temperature threshold to define the frost-free period affecting the crop.

Palabras Clave: Perfil térmico vertical, microambiente del canopeo, capa negra, senescencia, siembra tardía

Keywords: Vertical termal profile, canopy microclimate, black layer, leaf senescence, late sowing

Introducción

La mayoría de los sistemas agrícolas de zonas templadas están expuestos, durante el otoño, a bajas temperaturas que afectan a los cultivos por al menos dos vías distintas: el congelamiento letal del tejido expuesto y la inhibición subletal y persistente de la fotosíntesis en el tejido sobreviviente. La primera vía corresponde a la helada, definida como la ocurrencia de una temperatura del aire igual o inferior a 0 °C medida a 1,5 m de altura en abrigo meteorológico (De Melo-Abreu et al., 2021).

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de verano de mayor relevancia en el Sudeste de Buenos Aires, y su rendimiento depende del número de granos fijados y de su adecuado llenado (Bonelli et al., 2023). Una helada de otoño podría anticipar la senescencia foliar del tejido expuesto, mientras que una sucesión de noches frías no letales podría reducir de forma sostenida la capacidad fotosintética del tejido sobreviviente; ambos mecanismos acortarían el período de llenado y disminuirían el peso final del grano. La correcta caracterización de las condiciones que promueven el cese del llenado del grano es necesaria para estimar, mediante modelos de simulación de cultivos, el atraso máximo de siembra que el cultivo tolera sin comprometer la finalización de su ciclo. Sin embargo, la predicción del daño por bajas temperaturas a partir de datos de estación meteorológica enfrenta varias limitaciones (Richetti et al., 2025). Este trabajo se enfoca en dos de ellas.

La primera limitación es que la relación entre las características del evento de helada (velocidad de descenso de la temperatura, duración, temperatura mínima alcanzada) o del frío subletal en el canopeo (número de días con temperaturas por debajo de un umbral) y la magnitud del daño foliar o el cese del llenado del grano está pobremente cuantificada en maíz durante el estado reproductivo. En relación con el evento de helada, los modelos de simulación difieren en cómo representan este proceso: CERES-Maize, CropSyst y AquaCrop no simulan daño de órganos por temperaturas extremas bajas, mientras que APSIM-Maize asume una pérdida lineal de área foliar de 0 a 100 % entre 0 y −6 °C. De Melo-Abreu et al. (2016) reportaron una temperatura crítica de daño (Tcrit, la temperatura máxima que provoca lesión en un órgano expuesto por más de 30 minutos) de entre −2 y −3 °C durante el llenado de granos, sin especificar la altura de medición, el órgano evaluado ni el criterio de magnitud del daño. En relación con el frío subletal, se conoce que reducen de forma sostenida la fotosíntesis de las hojas sobrevivientes, con caídas de hasta 40 % tras dos noches consecutivas por debajo de 3 °C (Dwyer y Tollenaar, 1989), efecto que persiste varios días en el cultivo de maíz (Ying et al., 2000). El llenado podría sostenerse transitoriamente por translocación de reservas del tallo (Bonelli et al., 2023), hasta agotarse. Hasta donde sabemos, no se ha caracterizado la ocurrencia de heladas ni el frío subletal dentro de un canopeo de maíz, ni se ha evaluado su relación con la senescencia foliar y/o con el cese del llenado del grano.

La segunda limitación es que la temperatura registrada en la estación (en abrigo meteorológico, pero al aire libre) puede diferir sustancialmente de la que experimenta la planta dentro del canopeo (en abrigo meteorológico, pero dentro del cultivo). Esta discrepancia se acentuaría en heladas radiativas, que ocurren en noches despejadas y calmas: en la estación, el perfil térmico muestra temperaturas menores en superficie que a 1,5 m (Oke, 1970), mientras que dentro del canopeo el perfil tiende a ser isotérmico, porque el cultivo retiene y reemite la radiación emitida por el suelo (Villalobos et al., 2016). Sin embargo, hasta donde sabemos, el perfil vertical de temperaturas mínimas no ha sido caracterizado dentro de un canopeo de maíz durante el llenado de granos, y su descripción podría ayudar a explicar las discrepancias entre los registros en la estación meteorológica y aquellos en el cultivo.

Este trabajo tiene como objetivo explorar el ambiente térmico (frío subletal y ocurrencia de heladas) dentro del canopeo de maíz y su relación con el cese del

crecimiento del grano y de las temperaturas en la estación meteorológica oficial del INTA. Se espera que estos resultados orienten la incorporación del efecto de las heladas y del frío subletal acumulado en los modelos de simulación de maíz, mejorando su capacidad predictiva ante atrasos de siembra en localidades templadas como Balcarce.

Materiales y métodos

Experimento y mediciones

Se realizó un experimento en la Unidad Integrada Balcarce (UIB). Se utilizaron 3 híbridos de maíz de diferente largo de ciclo: P9946VYHR de MR99, P0622VYHR de MR 105 y DK7272 de MR120; el maíz se sembró de manera manual el 27 de enero de 2026, con una densidad de 7 plantas m^{-2}, con surcos distanciados a 0,52 m, en parcelas de 10 m de largo y 4 surcos de ancho. Se realizó labranza convencional, se fertilizó de manera adecuada y se regó al inicio para asegurar adecuada disponibilidad de agua. El diseño fue completamente aleatorizado, con tres repeticiones.

Se instalaron sensores de temperatura y humedad relativa (ATMOS-14) a tres alturas dentro del canopeo (0,05; 1,5 y 2 m) en cada repetición, a partir de los 20 días desde la emergencia. En la estación meteorológica convencional de la EEA INTA Balcarce (130 m s.n.m.), ubicada a 550 m del cultivo y 8 m por encima de este, se registró la temperatura del aire a 0,05 y 1,5 m de altura. En ambos sitios las variables meteorológicas se registraron cada 30 minutos hasta la madurez fisiológica y se determinó la temperatura mínima absoluta diaria para cada altura, independientemente de la hora de ocurrencia.

Se siguió la evolución de la senescencia foliar de manera visual identificando la fracción de hojas verdes remanentes cada 10-20 días. El cese del crecimiento del grano se cuantificó de dos maneras: (i) por la fecha en que se evidenció la capa negra y (ii) mediante un modelo bilineal de crecimiento del grano. Para esto último se siguió la evolución del peso del grano (PG) desde 2 semanas de la floración. Cada 4 a 7 días, se muestrearon 7 granos por espiga de la parte central de 2 espigas representativas por parcela. Los granos se pesaron en húmedo, se secaron en estufa 80°C y se determinó el peso seco (PG) y la humedad relativa del grano (HRG).

Análisis de datos

Para cada híbrido, el PG (mg $grano^{-1}$) se modeló en función de los días desde silking (dds) mediante un modelo lineal-plateau, ajustado sobre las observaciones individuales de repetición.

$PG = a + b \times dds$, si $dds \leq xc$
$PG = a + b \cdot xc$ = Plateau, si $dds > xc$

Donde dds es días desde silking, y xc = día de cese de llenado de grano. Los parámetros a, b y xc se estimaron por mínimos cuadrados no lineales (algoritmo de Levenberg-Marquardt; SciPy v1.17.1, Python). El coeficiente de determinación (R^2) fue superior a 0,8 en todos los casos.

Resultados

Crecimiento del grano y área foliar verde

La fecha de cese de crecimiento del grano determinado por ajuste bilineal fue entre el 9 de junio (híbrido de menor MR) y el 21 de junio (híbrido de mayor MR) y por la evidencia de capa negra fue el 2 de julio (Tabla 1 Figura 1). El PG máximo alcanzado fue entre 106 y 167 mg grano-1 (Tabla 1). La HRG en el momento del cese del crecimiento del grano fue entre 58 y 67%.

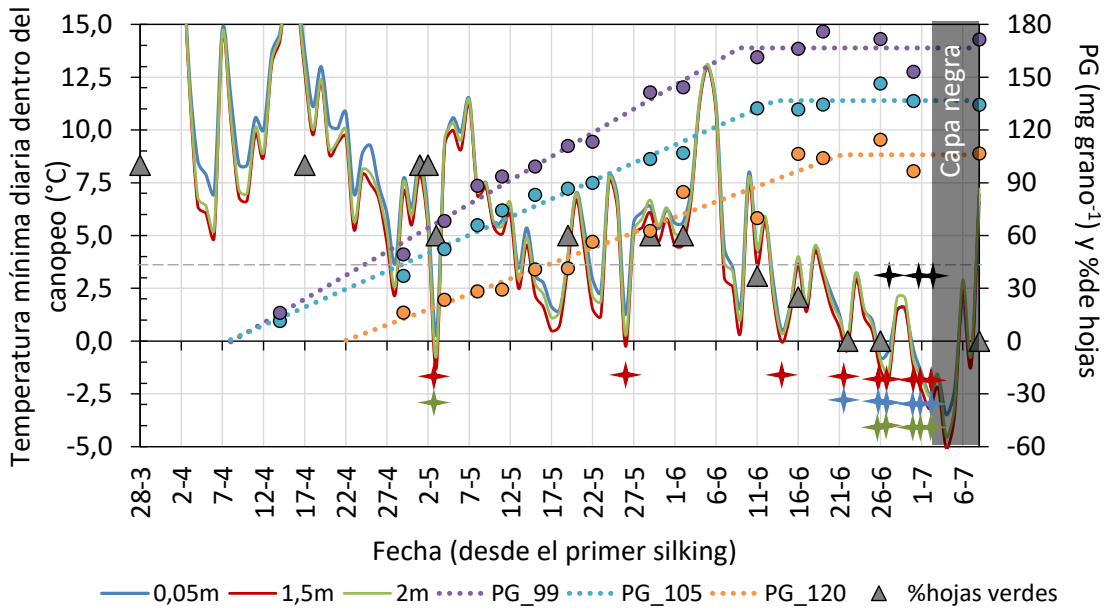

Figura 1: Temperatura mínima diaria dentro del canopeo registrada a 0,05 (celeste), 1,5 (rojo) y 2 (verde) metros de altura y peso de grano (PG, mg grano^{-1}) para híbridos de diferente madurez relativa: MR99 (línea punteada violeta), MR105 (línea punteada celeste) y MR120 (línea punteada naranja) y porcentaje de hojas verdes (%) (triángulos grises), en función de la fecha desde la floración del híbrido más precoz. Las cruces indican registro de helada (T≤0°C) a 2 m (verde), 1,5 m (roja) y 0,05 m (azul) dentro del canopeo. La cruz negra indica heladas (T≤0°C) registradas en la estación meteorológica oficial. Se indica el momento desde el cual la capa negra fue evidente (2 de julio).

Tabla 1: Fecha y días desde silking (dds) de cese de crecimiento del grano determinado por ajuste bilineal y por capa negra, valor de PG y de HGR en el plateau del ajuste bilineal y fecha con área foliar verde (AFV) remanente de 60% y 0%.

Híbrido	Cese crecimiento Fecha (dds)		PG (mg grano^{-1})	HRG (%)	AFV Fecha (dds)	
	Bilineal	Capa negra			60%	0%
MR99	9/6 (73)	2/7 (96)	167	58	3/5 (36)	22/6 (86)
MR105	13/6 (76)	2/7 (95)	137	63	3/5 (35)	22/6 (76)
MR120	21/6 (75)	2/7 (86)	106	67	3/5 (26)	22/6 (75)

El área foliar verde disminuyó al 60% el 3 de mayo (Tabla 1). En ese momento, la senescencia de hojas ocurrió solamente en el estrato superior, desde 1,5 m hacia arriba (Figura 2). El 11 de junio se percibía menor porcentaje de área foliar verde remanente y de color verde menos intenso (Figura 2). El 100% de senescencia ocurrió el 22 de junio (Tabla 1, Figura 2).

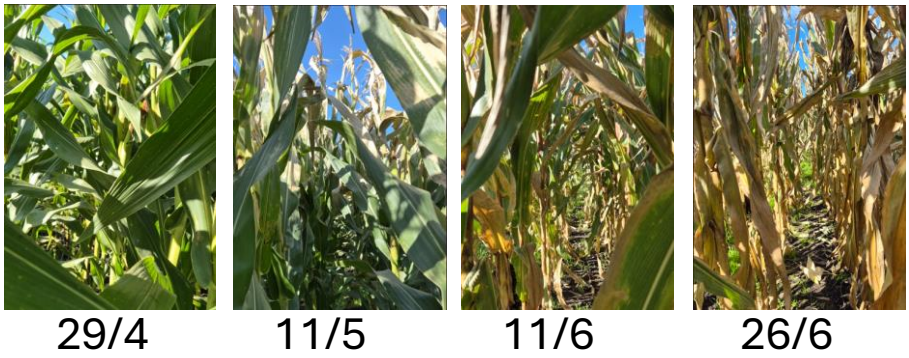

Figura 2: Evolución de la senescencia del canopeo del híbrido más largo (MR120) en 4 fechas de observación (29 de abril, 11 de mayo, 11 y 26 de junio).

Ambiente térmico en el canopeo y en la estación meteorológica oficial

Las temperaturas mínimas registradas en las tres alturas (0,05, 1,5 y 2m) decrecieron desde fines de marzo (~10-12°C) hasta valores próximos o por debajo de 0°C hacia fines de junio-principios de julio (Figura 1). Las heladas (T≤0°C) iniciaron en mayo en diferentes alturas y se concentraron hacia fines de junio (Figura 1). Se registraron entre 20 (0,05m) y 25 (1,5m) días con temperaturas menores a 3°C hasta la aparición de la capa negra (Figura 1).

Durante el llenado de granos ocurrieron heladas de diferente intensidad y a distintas alturas (Figura 1). Hasta el cese del crecimiento del grano en todos los genotipos, determinado por modelo bilineal (hasta 21 de junio), se registraron 3 heladas. La más intensa ocurrió el 3 de mayo y se registró en todo el estrato superior desde 1,5m (Figura 3). Desde el 22 de junio se registraron heladas en todo el perfil del canopeo y hacia la aparición de la capa negra se registraron las dos heladas de mayor intensidad (Figura 3). En general, la temperatura tendió a ser mayor en superficie que en altura.

En la estación meteorológica oficial, la temperatura a 1,5 m fue superior a la registrada en el canopeo; la primera helada registrada en la estación meteorológica oficial a 1,5 m fue el 27 de junio (Figura 1). A su vez, el perfil de temperatura fue siempre más frío en la superficie del suelo que en altura (Figura 3).

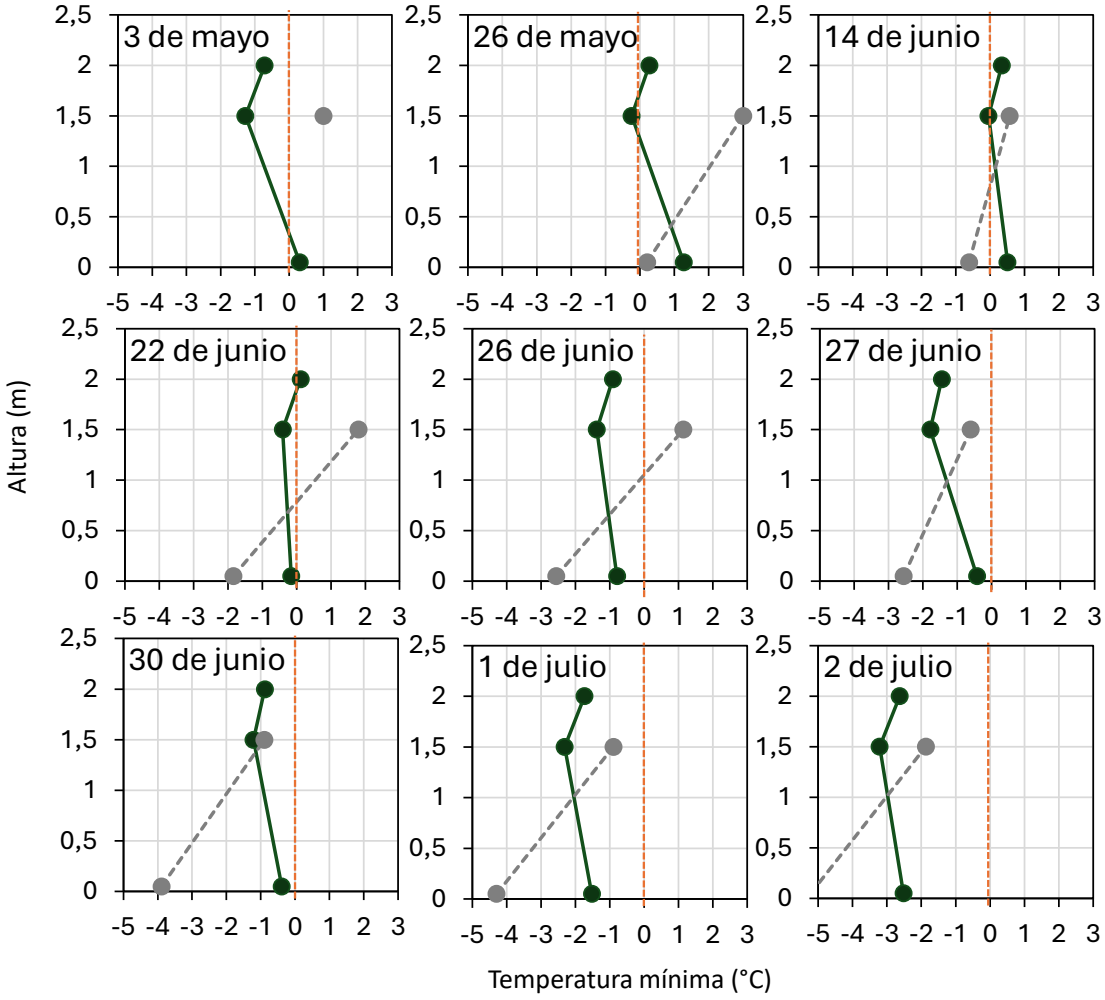

Figura 3: Perfiles de temperatura mínima en días con ocurrencia de helada en alguna altura del perfil, dentro del canopeo (verde) y en la estación meteorológica oficial (gris).

Discusión

El PG máximo alcanzado fue considerablemente inferior al obtenido en fechas de siembra recomendadas (242 mg grano^{-1} para el híbrido MR120 sembrado el 20 de noviembre). Asimismo, la HRG al momento del cese del crecimiento fue superior al valor que se alcanza habitualmente en madurez fisiológica, cuando el llenado se completa (35%; Sala et al., 2007). También, la acumulación de sumas térmicas fue menor en siembras de enero que en siembras de noviembre (500°Cd menor para el híbrido MR120). En conjunto, estos resultados indican que el llenado del grano fue interrumpido de manera anticipada.

La primera helada registrada en el canopeo ocurrió en el estrato superior (1,5 y 2 m) y se asoció con senescencia foliar en ese mismo estrato; las hojas del estrato inferior, expuestas a temperaturas más altas, no resultaron dañadas. Esto sugiere que

temperaturas de magnitud y duración similares a las registradas a 1,5 m pueden ser suficientes para provocar la muerte del tejido foliar. Con posterioridad no se registraron heladas de magnitud comparable, por lo que la senescencia gradual observada en las semanas siguientes sería atribuible al efecto de temperaturas subletales, que habrían inhibido la fotosíntesis del tejido sobreviviente (Dwyer y Tollenaar, 1989).

De los dos criterios utilizados para determinar el cese del crecimiento del grano (Tabla 1), el ajuste bilineal ubicó ese cese antes de que ocurrieran heladas en todo el perfil del canopeo. Bajo este criterio, el fin del llenado estaría mediado principalmente por la caída de la capacidad fotosintética del canopeo, tanto por la pérdida de área foliar verde asociada a fríos letales como por la reducción de la fotosíntesis asociada a fríos subletales. Que el ajuste bilineal difiera entre genotipos sugiere, además, que este método captura diferencias genotípicas en la capacidad de translocación de reservas hacia el grano y/o en la tolerancia al frío. La aparición de la capa negra, en cambio, ocurrió de manera simultánea en los tres genotipos y con posterioridad a varias heladas consecutivas e intensas en todo el perfil del canopeo, lo que sugiere una asociación entre este evento y la ocurrencia de heladas extremas.

Más allá de las diferencias de magnitud entre las temperaturas mínimas registradas en la estación meteorológica y dentro del canopeo, atribuibles al sitio de medición, también se observaron diferencias en el perfil vertical de temperaturas mínimas. Dentro del canopeo, la radiación solar es interceptada mayoritariamente por el estrato de mayor densidad foliar durante el día (i.e., cercano a la espiga), pero es ese mismo estrato el que se enfría en mayor medida durante la noche, al emitir radiación de onda larga hacia el suelo y hacia la atmósfera. La absorción y reemisión de esa radiación en el estrato inferior generarían un microambiente que evitaría que la temperatura descienda a niveles lesivos para las hojas de ese estrato.

Conclusiones

La relación entre el daño por heladas en el cultivo y la temperatura registrada en la estación meteorológica resulta compleja de establecer, dado que el canopeo genera un microambiente que hace que la magnitud del frío difiera entre alturas del perfil y respecto de la registrada en la estación. A esto se suma que el cese del llenado del grano no respondería a un único factor: la combinación de heladas letales y fríos subletales habría contribuido conjuntamente a interrumpirlo. La formación de la capa negra podría constituir un indicador más robusto de asociación con eventos de helada extremos, aunque su ocurrencia rezagada respecto del cese real del crecimiento del grano —hasta 20 días, según el híbrido— limita su utilidad para anticipar el momento en que el daño ocurre. La implicancia práctica de estos resultados radica en que las temperaturas registradas en la estación agrometeorológica podrían no representar la temperatura real que experimenta la hoja dentro de un cultivo en pie, particularmente en siembras tardías con canopeos densos como los aquí evaluados. Esto cuestiona el uso del umbral de temperatura de estación para definir el período libre de heladas que afecta al cultivo.

Referencias

Bonelli, L.; Cerrudo, A.; Andrade, J. 2023. Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz. Andrade, F.; Otegui, M.; Cirilo, A.; Uhart, S. (Eds).

De Melo-Abreu, J.P.; Villalobos, F.J.; Mateos, L. 2016. Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture. Villalobos, F.J.; Fereres, E. (Eds). Springer International Publishing AG.

Dwyer, L.M.; Tollenaar, M. 1989. Genetic improvement in photosynthetic response of hybrid maize cultivars, 1959–1988. Canadian Journal of Plant Science, 69, 81-91.

Oke, T.R. 1970. The temperature profile near the ground on calm clear nights. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 96(407), 14-23.

Richetti, J.; Sadras, V.O.; He, D.; Leske, B.; Hu, P.; Beletse, Y.; Cossani, C.M.; Nguyen, H.; Zheng, B.; Deery, D.M.; Dreccer, M.F.; Whish, J.; Lilley, J. 2025. Challenges in modelling the impact of frost and heat stress on the yield of cool-season annual grain crops. Frontiers in Plant Science, 16, 1613432.

Sala, R.G.; Andrade, F.; Westgate, M. 2007. Maize kernel moisture at physiological maturity as affected by the source-sink relationship during grain filling. Crop Science, 47, 711-716.

Villalobos, F.J.; Mateos, L.; Testi, L.; Fereres, E. 2016. Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture. Villalobos, F.J.; Fereres, E. (Eds). Springer International Publishing AG.

Ying, J.; Lee, E.A.; Tollenaar, M. 2000. Response of maize leaf photosynthesis to low temperature during the grain-filling period. Field Crops Research, 68, 87-96.