

**SECADO DE LOS GRANOS DE MAÍZ: EFECTO DEL GENOTIPO Y LA
FECHA DE SIEMBRA**

Trabajo Final de Grado
del alumno



**Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales.
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.**

Pergamino, 30 de noviembre de 2023

**SECADO DE LOS GRANOS DE MAÍZ: EFECTO DEL GENOTIPO Y LA
FECHA DE SIEMBRA**

Trabajo Final de Grado

del alumno

BAUTISTA EMANUEL TISERA

Aprobada por el Tribunal Evaluador

Roberto Daniel Lorea
Evaluador

Facundo Curin
Evaluador

María de los Ángeles Rossini
Evaluadora

Dra. María Elena Otegui
Co-Director/a

Lic. Yésica Daniela Chazarreta
Directora

**Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales,
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires**

Pergamino, 30 de noviembre de 2023

ÍNDICE

1. Resumen	4
2. Introducción	5
1.1 Descripción y evolución del escenario productivo del maíz en la Región Pampeana de la República Argentina	5
1.2 Determinantes del secado de los granos	7
2. Hipótesis	8
3. Objetivos	8
3.1 Objetivo general	8
3.2 Objetivos específicos	8
4. Materiales y métodos	9
4.1 Diseño experimental	9
4.2 Mediciones	10
4.3 Análisis de datos	10
5. Resultados	12
5.1 Condiciones meteorológicas	12
5.2 Fenología	14
5.3 Secado de los granos	15
6. Discusión	19
7. Conclusiones	22
8. Bibliografía	23

RESUMEN

Durante la última década, la producción del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) en Argentina sufrió cambios vinculados principalmente con el atraso en la fecha de siembra. Tradicionalmente, para la Región Pampeana Central, la siembra del cultivo de maíz se situaba al inicio de la primavera (septiembre – octubre). Sin embargo, durante la última década, los productores comenzaron a retrasar la siembra hacia los meses de noviembre, diciembre e incluso enero, como estrategia para estabilizar los rendimientos interanuales debido a la menor probabilidad de incidencia de déficits hídricos alrededor de floración, que ocurren comúnmente en siembras tempranas. Actualmente, el ~50 % de la superficie de maíz cultivada en Argentina corresponde a siembras tardías. Un aspecto que ha cobrado relevancia con el atraso en la fecha de siembra es el secado de los granos, en el periodo comprendido entre la madurez fisiológica y humedad comercial de cosecha (*i.e.* 14,5% de humedad en grano), ya que en siembras tardías ocurre en los meses del otoño – invierno bajo condiciones meteorológicas que no favorecen la pérdida de humedad desde la superficie del grano, demorando así el momento de cosecha, con la consecuente pérdida de calidad y rendimiento por mayor incidencia de enfermedades de la espiga, vuelco y/o quebrado de plantas. En el presente trabajo se evaluó el efecto de la fecha de siembra y el genotipo sobre el secado de los granos post-madurez fisiológica en seis híbridos de distintas compañías semilleras actualmente disponibles en el mercado, adaptados a la Región Pampeana Central de Argentina. Mediante un modelo de regresión lineal simple, se determinaron las tasas de secado post-madurez fisiológica y el tiempo requerido (en días y tiempo térmico) para alcanzar humedad comercial. El atraso de la fecha de siembra redujo significativamente las tasas de secado medias post-madurez fisiológica para todos los híbridos, tanto en días (-46 %; $p < 0,001$) como en tiempo térmico (-11 %; $p < 0,01$), con una extensión (+13 %) del tiempo térmico medio requerido para alcanzar la humedad comercial, y un comportamiento diferencial de los híbridos entre fechas de siembra para los días a humedad comercial ($p < 0,05$).

Palabras clave: Maíz (*Zea mays L.*), fecha de siembra, humedad del grano, secado de los granos post-madurez fisiológica, humedad comercial.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción y evolución del escenario productivo del maíz en la Región Pampeana de la República Argentina

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos de mayor importancia para Argentina, que se ubica como el segundo exportador mundial (FADA 2022). Durante la campaña 2020/2021 se sembraron 9,74 M ha, la superficie más elevada registrada en el país (MAGYP 2022). La expansión del área se relaciona con el incremento de los rendimientos y la posibilidad de diferir la fecha de siembra (FS; Otegui *et al.* 2021).

En Argentina, el maíz se produce casi exclusivamente bajo condiciones de secano. En esas condiciones, para lotes de siembra temprana (septiembre-octubre) en la Región Pampeana Central, la principal restricción climática es el suministro de agua alrededor de la floración (Hall *et al.* 1992). Dicho período es considerado crítico para la definición del rendimiento porque en él se define el número de granos (Cerrudo *et al.* 2013, Fischer y Palmer 1984), que es su principal determinante (Andrade *et al.* 1996, Borrás *et al.* 2004).

Las siembras tempranas en primavera ubican la floración del cultivo entre la segunda quincena de diciembre y la primera de enero, en coincidencia con alta temperatura y radiación solar (Otegui *et al.* 1995, 1996). En condiciones de buena oferta hídrica (*e.g.* bajo riego), y con híbridos adaptados a la zona (*ca.* 80 días a floración) sembrados en alta densidad, se obtiene entonces la máxima productividad en la región (Otegui *et al.* 1996). Sin embargo, en estas FS y en condiciones de secano, se observa la mayor variabilidad interanual de rendimiento debido a la mayor incidencia de déficit hídrico (Maddonni 2012, Otegui *et al.* 2021).

La aparición del maíz Bt en 1997 (Williams *et al.* 1997) permitió la posibilidad de retrasar la FS hacia principios/mediados de diciembre evitando mermas en el rendimiento por incidencia de plagas como el barrenador del tallo (*Diatraea saccharalis*), la oruga militar tardía (*Spodoptera frugiperda*) o la oruga de la espiga (*Helicoverpa zea*). La aparición de esta tecnología significó un hito en la historia productiva, ya que permite a los productores retrasar la FS sin las pérdidas de rendimiento asociadas a lepidópteros. Los maíces cultivados en

fechas tardías tienen un periodo vegetativo más corto (ca. 60 días a floración), producto de las altas temperaturas durante la etapa de prefloración (Otegui *et al.* 1995, Mercau y Otegui 2014). La floración ocurre a mediados de febrero, desplazando tanto el período crítico como el período de llenado de los granos hacia el final del verano-principios del otoño, con un consecuente deterioro del ambiente fototermal (Maddonni 2012, Bonelli *et al.* 2016). Como resultado, los rendimientos potenciales en estas FS son generalmente menores (Otegui *et al.* 1996). A pesar de esto, la adopción de siembras tardías permite reducir la variabilidad interanual del rendimiento en grano al disminuir la probabilidad de ocurrencia de déficits hídricos alrededor de floración (Maddonni 2012, Mercau y Otegui 2014, Otegui *et al.* 2021).

Los beneficios de retrasar la FS fueron evaluados dentro de la región húmedo-templada de Argentina poco después del lanzamiento del maíz Bt (Otegui *et al.* 2002). Sin embargo, la adopción de las FS tardías no tuvo lugar hasta después de las campañas 2007/2008 y 2008/2009 en donde dos sequías consecutivas causadas por condiciones climáticas correspondientes al fenómeno climático La Niña empujaron a replantearse el paradigma y se consideró la adopción de FS tardías como una forma de evitar la ocurrencia de déficits hídricos alrededor de la floración. En la última década, la superficie de maíz en siembra tardía más el maíz de segunda (*i.e.* sobre un cultivo invernal antecesor como cebada, trigo o arveja) aumentó desde prácticamente cero hasta alcanzar actualmente un 45-50 % de la superficie total destinada a maíz en Argentina (Otegui *et al.* 2021, Bolsa de Cereales 2022).

A pesar de los beneficios de retrasar la FS de maíz, las siembras posteriores a noviembre ubican el secado de los granos en condiciones que no favorecen la pérdida de humedad (Bonelli *et al.* 2016, Chazarreta *et al.* 2021, 2023). Consecuentemente, los cultivos deben permanecer durante varios meses en pie en el campo hasta alcanzar la humedad de cosecha (*i.e.* 14,5 %), o cosechar de forma anticipada con un mayor porcentaje de humedad y afrontar el costo del secado artificial. Dejar el cultivo en pie durante todo el otoño y, en ocasiones gran parte del invierno, trae aparejados problemas en la calidad de los granos debido a la mayor incidencia de enfermedades de la espiga (Ferraguti

et al. 2016) o pérdidas de rendimiento debido al quebrado de tallos y vuelco de plantas (Parsons y Munkvold 2010).

1.2. Determinantes del secado de los granos

La pérdida de humedad de los granos puede dividirse en dos etapas: la primera durante el llenado efectivo del grano y la segunda luego de la madurez fisiológica (MF). La primera fase, que tiene lugar entre el inicio del llenado de los granos y la MF, está determinada por el desplazamiento de agua por parte de los asimilados y puede ser interpretada como una pérdida de agua asociada al desarrollo de los granos (Brooking 1990). En sus fases finales, este proceso suele identificarse a través del avance de la 'línea de leche' (Afuakwa y Crookston 1984) desde la corona del grano (porción más 'pastosa') hacia su base (porción más 'lechosa'). La segunda fase tiene lugar post-MF cuando la conexión placenta-chalaza colapsa hasta necrosarse y formar la denominada 'capa negra' (Daynard y Duncan 1969). A partir de entonces, no existe más intercambio de fluidos planta-grano, pero sí grano-atmósfera a través de pérdidas evaporativas desde la superficie del propio grano. Si bien esta última etapa del secado del grano está fuertemente influenciada por las condiciones ambientales (Chazarreta *et al.* 2021, 2023; Martínez-Feria *et al.* 2019; Nielsen 2018), características asociadas a la estructura de los granos o la espigas, como el número y el peso de las chalas, el porcentaje de humedad en grano al momento de aparición de capa negra (Cavalieri y Smith 1985, Troyer y Ambrose 1971) y/o el grosor y la permeabilidad de los pericarpios de los granos (Prudy y Crane 1967), pueden afectar la tasa de secado post-MF.

2. HIPÓTESIS

La fecha de siembra del cultivo de maíz afecta el secado de los granos post - madurez fisiológica de manera diferencial según el genotipo considerado.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Analizar el secado de los granos post - madurez fisiológica en un conjunto de híbridos comerciales de maíz al ser cultivados en fechas de siembra contrastantes (temprana y tardía).

3.2. Objetivos específicos

- I. Realizar el seguimiento de indicadores de madurez fisiológica (e.g. línea de leche, capa negra, humedad del grano).
- II. Determinar la tasa de secado de los granos post - madurez fisiológica para cada combinación de híbrido y fecha de siembra.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Diseño experimental

Los experimentos se realizaron en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Pergamino (33°56'S, 60°33'W) durante la campaña agrícola 2021/2022 sobre un suelo Argiudol típico correspondiente a la serie Pergamino. Se evaluó un conjunto de 6 híbridos comerciales de maíz en FS contrastantes (temprana y tardía). El experimento consistió en un diseño factorial en bloques completamente aleatorizados (DBCA) con dos factores (FS e híbridos). El factor FS presentó dos niveles: siembra temprana (15 de octubre) y siembra tardía (7 de diciembre). El factor híbrido presentó seis niveles, constituidos por seis híbridos comerciales de maíz actualmente disponibles en el mercado, correspondientes a 6 compañías semilleras: DK 72-27 PRO4 (Dekalb), NEXT 22.6 PWU (Brevant), P1815 VYHR (Pionner), LT 721 PRO4 (La Tijereta), NK 979 VIP3 (NK), NS 78-18 VIT (Nidera). Los tratamientos surgieron de la combinación de los factores (FS e híbrido) en cada uno de sus posibles niveles. Cada tratamiento tuvo tres repeticiones. La siembra se realizó de forma manual, colocando 3 semillas por posición y raleando en V2-V3 (Ritchie y Hanway 1982), para lograr una densidad de 8,5 plantas m⁻². Cada parcela consistió en 3 surcos de 5 m de largo, con una distancia entre surcos de 0,52 m. Las parcelas se fertilizaron con 250 kg N ha⁻¹ aplicados en forma de urea en V5. El perfil se mantuvo cerca de capacidad de campo mediante riego por aspersión. Se realizaron los controles químicos y/o culturales necesarios para evitar la presencia de plagas animales, enfermedades y/o malezas.

A lo largo del ciclo del cultivo, se registraron diariamente las temperaturas máximas medias y mínimas, la humedad relativa (HR), las precipitaciones y la radiación solar global incidente (RI) en una estación meteorológica situada en el lugar de los experimentos.

4.2. Mediciones

Se realizó el seguimiento de la fenología de los híbridos en cada parcela según la escala de Ritchie y Hanway (1982), incluyendo los estadios de emergencia (VE), anthesis, emergencia de estigmas o *silking* (R1) y MF (R6). Se realizó un seguimiento semanal de la línea de leche, y se determinó el momento de aparición de la capa negra. Ambos rasgos se observaron en granos de la porción media de la espiga, muestreando al azar una espiga por parcela. A partir de la aparición de la capa negra, se consideró que se había alcanzado la madurez fisiológica y se realizó el seguimiento de la humedad de los granos de forma semanal. Para ello, se extrajeron 20 granos de la porción central de la espiga. Los granos fueron inmediatamente pesados para determinar su peso fresco (Pf). Luego, se llevaron a estufa a 62 °C durante 7 días para posterior determinación de su peso seco (Ps).

4.3. Análisis de datos

Los días y el tiempo térmico (TT) transcurridos desde MF hasta los diferentes momentos de muestreo se computaron a partir de la fecha promedio de MF de cada parcela. El TT se calculó como la sumatoria de las diferencias entre la temperatura media diaria y una temperatura base de 8 °C para el periodo pre-floración (Ritchie y Nesmith 1991) y de 0 °C para el periodo post-floración (Muchow 1990).

El déficit de presión de vapor (DPV) fue obtenido como la diferencia entre la presión de vapor saturado (PVs) y la presión de vapor actual (PVa), siendo $PVs = 0.611 \exp [(17.27 T_m)/(T_m+237.3)]$ y $PVa = PVs \times HR$ (Connor *et al.* 2011).

La humedad porcentual del grano en base húmeda se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad del grano (\%)} = [(Pf - Ps) / Pf] \times 100 \quad [1]$$

Se ajustó un modelo de regresión lineal a la evolución de la humedad del grano en función de los días y el TT desde MF:

$$\text{Humedad del grano (\%)} = a_1 + b_1X \quad [2]$$

donde a_1 es la ordenada al origen (% humedad), b_1 es la tasa de secado (en % día⁻¹ o % °Cd⁻¹) y X son los días o el TT (°Cd) transcurridos desde MF.

Los datos fueron analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de la FS, híbrido y la interacción FS × híbrido con el programa estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.* 2011). La comparación de medias de los tratamientos se realizó mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

5. RESULTADOS

5.1. Condiciones meteorológicas

Las distintas FS expusieron al cultivo a condiciones meteorológicas contrastantes. Para las siembras tempranas, durante el periodo siembra-R1 (S-R1), comprendido entre los meses de octubre y diciembre, el cultivo exploró una temperatura media del aire de 22 °C con máximas que alcanzaron los 37 °C en el mes de diciembre, un DPV medio de 1,35 kPa y una RI media de 25,4 MJ m⁻² día⁻¹. El periodo comprendido entre R1 y madurez fisiológica (R1-MF) se prolongó desde finales de diciembre hasta principios de marzo. La temperatura media fue de 24 °C con máximas que superaron los 40 °C. El DPV medio fue de 1,45 kPa y una RI media de 24 MJ m⁻² día⁻¹. En FS tardías, el periodo S-R1 tuvo lugar entre los meses de diciembre y enero y se registraron incrementos para todas las variables meteorológicas analizadas en relación con las siembras tempranas. La temperatura media del aire fue de 25,6 °C (+16 %), con máximas que alcanzaron los 40 °C, la RI media de 31 MJ m⁻² día⁻¹ (+22 %) y el DPV medio de 1,68 kPa (+24 %). El periodo R1-MF se situó entre febrero y mediados de abril, verificando una disminución de la temperatura media (17,4 °C; -27 %), la radiación solar incidente (17 MJ m⁻² día⁻¹; -29 %) y el DPV (0,72 kPa, -50 %) en comparación con las siembras tempranas.

El atraso en la FS posicionó el secado de los granos post-madurez fisiológica en condiciones fototermiales declinantes (Figura 1). Se registró un descenso del 35 % de la temperatura media del aire (17,3 °C en siembra temprana, 11,2 °C en siembra tardía) y una caída del 29 % de la RI media (14 MJ m⁻² día⁻¹ en siembra temprana, 10 MJ m⁻² día⁻¹ en siembra tardía). El DPV disminuyó un 36 % (0,6 kPa en siembra temprana, 0,38 kPa en siembra tardía) como consecuencia del descenso de la temperatura media del aire y el aumento de la HR.

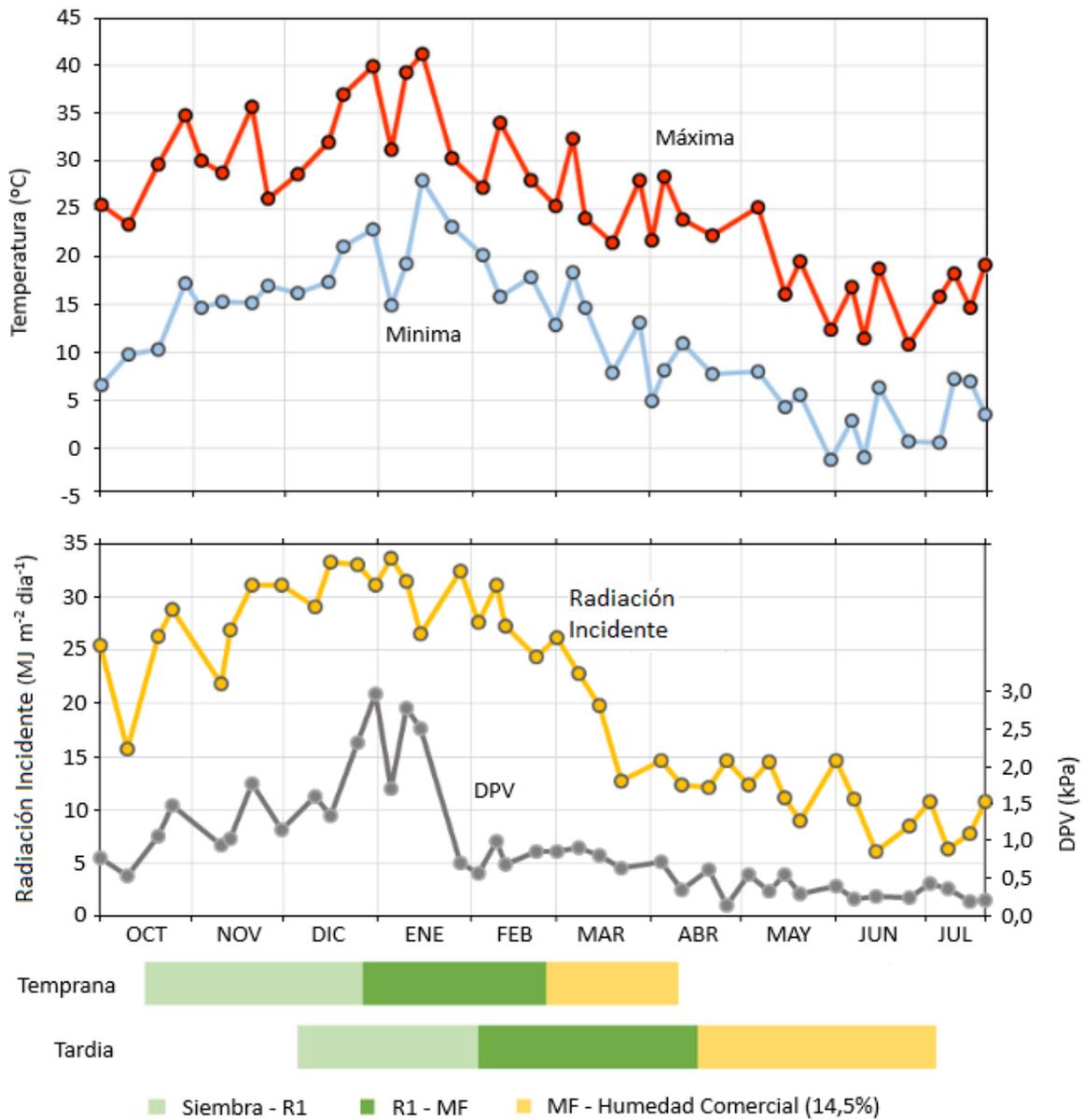


Figura 1. Evolución de las temperaturas máximas (rojo) y mínimas del aire (azul), la radiación incidente (línea amarilla) y el déficit de presión de vapor (línea gris) durante el ciclo de cultivo de 6 híbridos comerciales de maíz cultivados en dos fechas de siembra (temprana y tardía). Los gráficos de barra indican momento y duración de los diferentes estadios fenológicos: siembra-R1 (*silking*), R1-madurez fisiológica (MF) y de MF a humedad comercial (*i.e.* 14,5 %).

5.2 Fenología

La duración del período comprendido entre la siembra y R1 presentó una duración de 62-76 días. El atraso en la FS redujo un 18 % la duración media de dicho periodo (72 y 59 días para siembra temprana y tardía respectivamente). Para la FS temprana, se encontró una diferencia máxima de 6 días/55 °Cd entre el primer (NS 78-18 VIT) y el último (LT 721 PRO4) híbrido en alcanzar el estadio R1. En la FS tardía, esta diferencia fue de 5 días/105 °Cd, siendo P1815 VYHR el primer en alcanzar el estado R1 y LT721 PRO4 el último en hacerlo (Tabla 1). El período comprendido entre R1-MF presentó una duración de 59-76 días. El atraso en la FS extendió 21 % la duración media de este período (60 y 73 días para siembra temprana y tardía respectivamente; Tabla 1). Los híbridos difirieron en la duración del periodo R1-MF (6 días/150 °Cd para siembra temprana; 5 días/98 °Cd para siembra tardía).

Tabla 1. Fechas de ocurrencia y duración de las etapas fenológicas siembra-R1, R1 - madurez fisiológica (MF) expresadas en días y en TT (°Cd) para un conjunto de seis híbridos comerciales de maíz cultivados en fechas de siembra (FS) temprana y tardía.

FS	Híbrido	Siembra - R1 (días)	Siembra - R1 (°Cd)	Fecha de R1	R1 - MF (días)	R1 - MF (°Cd)	Fecha de MF
Temprana	DK 72-27 PRO4	72	1068	26-dic	61	1390	25-feb
	NEXT 22.6 PWU	74	1102	28-dic	59	1344	25-feb
	P1815 VYHR	71	1050	25-dic	62	1416	25-feb
	LT 721 PRO4	76	1133	29-dic	57	1297	25-feb
	NS 78-18 VIT	70	1028	24-dic	63	1447	25-feb
	NK 979 VIP3	73	1083	27-dic	60	1371	25-feb
Tardía	DK 72-27 PRO4	60	1009	3-feb	73	1314	17-abr
	NEXT 22.6 PWU	59	1003	2-feb	74	1326	17-abr
	P1815 VYHR	57	971	31-ene	76	1379	17-abr
	LT 721 PRO4	62	1027	4-feb	71	1281	17-abr
	NS 78-18 VIT	59	999	2-feb	74	1333	17-abr
	NK 979 VIP3	60	1014	3-feb	73	1306	17-abr

5.3. Secado de los granos

Tabla 2. Tasas de secado de los granos post-madurez fisiológica, días y TT a humedad comercial (*i.e.* 14,5 %), y fecha de cosecha para un conjunto de seis híbridos comerciales de maíz cultivados en fechas de siembra (FS) temprana y tardía.

FS	Híbrido	Tasa de secado (% °Cd ⁻¹)	TT a humedad comercial (°Cd)	Tasa de secado (% día ⁻¹)	Días a humedad comercial (14,5 %)	Fecha de cosecha (14,5 %)
Temprana	DK 72-27 PRO4	-0,031 A	683 AB	-0,541 A	38 A	4-abr
	NEXT 22.6 PWU	-0,028 AB	741 ABC	-0,485 AB	42 A	8-abr
	P1815 VYHR	-0,028 AB	675 A	-0,489 AB	38 A	4-abr
	LT 721 PRO4	-0,025 AB	707 ABC	-0,433 AB	40 A	6-abr
	NS 78-18 VIT	-0,021 B	868 ABCD	-0,373 BC	49 AB	15-abr
	NK 979 VIP3	-0,024 AB	967 BCD	-0,421 AB	54 ABC	20-abr
Tardía	DK 72-27 PRO4	-0,025 AB	875 ABCD	-0,263 CD	79 DE	5-jul
	NEXT 22.6 PWU	-0,026 AB	717 ABC	-0,288 CD	62 BCD	18-jun
	P1815 VYHR	-0,022 AB	798 ABC	-0,231 D	72 CDE	28-jun
	LT 721 PRO4	-0,024 AB	750 ABC	-0,246 CD	67 BCD	23-jun
	NS 78-18 VIT	-0,020 B	979 CD	-0,211 D	88 EF	14-jul
	NK 979 VIP3	-0,020 B	1124 D	-0,211 D	101 F	27-jul
FS		1,53E-3**	89,40*	1,85E-2***	5,51***	
Híbrido		5,28E-3**	171,51***	8,04E-2**	12,15***	
FS*Híbrido		8,74E-3ns	283,68 ns	1,33E-1ns	20,10*	

.Diferencia mínima significativa ($p \leq 0,05$); *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns= no significativa. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

El secado de los granos post-MF se describió ajustando un modelo de regresión lineal a la humedad de los granos en función de los días y del TT (Figura 2 y 3). Las tasas de secado calculadas exploraron un rango entre -0,211 y -0,541 % día⁻¹ (en función de los días) y entre -0,020 y -0,031 % °Cd⁻¹ (en función del TT; Tabla 2). El atraso en la FS produjo una reducción significativa de las tasas de secado medias post-MF, tanto en días (-46 %; -0,457 % día⁻¹ y -0,242 % día⁻¹ en siembra temprana y tardía respectivamente; $p < 0,001$) como en TT (-11 %; -0,026 % °Cd⁻¹ y -0,023 % °Cd⁻¹ para siembra temprana y tardía respectivamente; $p < 0,01$). Los híbridos difirieron significativamente en sus tasas de secado post-MF, tanto en días como en TT ($p < 0,01$). Al analizar los valores promedio de las tasas de secado post-MF en función del TT, los híbridos DK 72-

27 PRO4 (-0,028 % °Cd⁻¹) y NEXT 22.6 PWU (-0,027 % °Cd⁻¹) se diferenciaron significativamente de NK 979 VIP3 (-0,022 % °Cd⁻¹) y NS 78-18 VIT (-0,021 % °Cd⁻¹). Cuando se analizan los valores promedio de las tasas de secado post-MF en función de los días, el híbrido DK 72-27 PRO4 (-0,402 % día⁻¹) se diferenció significativamente de los híbridos NK 979 VIP3 (-0,316 % día⁻¹) y NS 78-18 VIT (-0,292 % día⁻¹), mientras que el híbrido NEXT 22.6 PWU (-0,386 % día⁻¹) se diferenció significativamente del híbrido NS 78-18 VIT (-0,292 % día⁻¹).

El atraso en la FS incrementó significativamente el TT medio a humedad comercial (+13%; 774 °Cd y 874 °Cd, para siembra temprana y tardía respectivamente; $p < 0,05$), con un comportamiento diferencial entre los híbridos ($p < 0,001$). El híbrido NK 979 VIP3 (1045 °Cd) difirió significativamente de los híbridos LT 721 PRO4, NEXT 22.6 PWU, P1815 VYHR y DK 72-27 PRO4 (729, 729, 736 y 779 °Cd a humedad comercial, respectivamente), mientras que el híbrido NS 78-18 VIT (923 °Cd) se diferenció significativamente de LT 721 PRO4, NEXT 22.6 PWU y P1815 VYHR (729, 729 y 736 °Cd a humedad comercial, respectivamente).

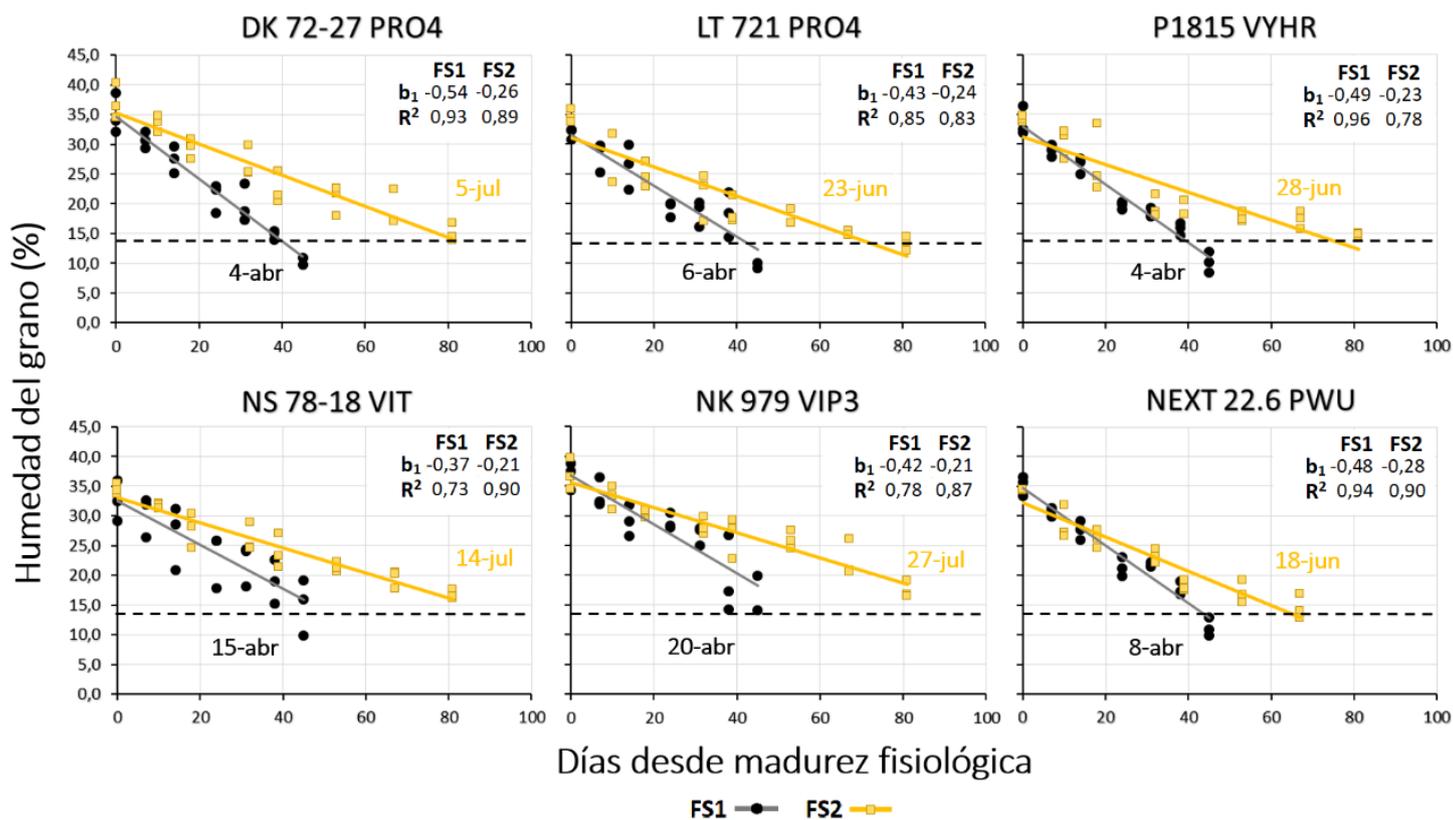


Figura 2. Evolución de la humedad del grano en función de los días desde madurez fisiológica, para un conjunto de seis híbridos comerciales evaluados en fechas de siembra temprana (FS1) y tardía (FS2). Las fechas de cosecha están indicadas en color negro y amarillo para siembra temprana y tardía respectivamente. La línea punteada horizontal indica el valor de humedad comercial (14,5 %).

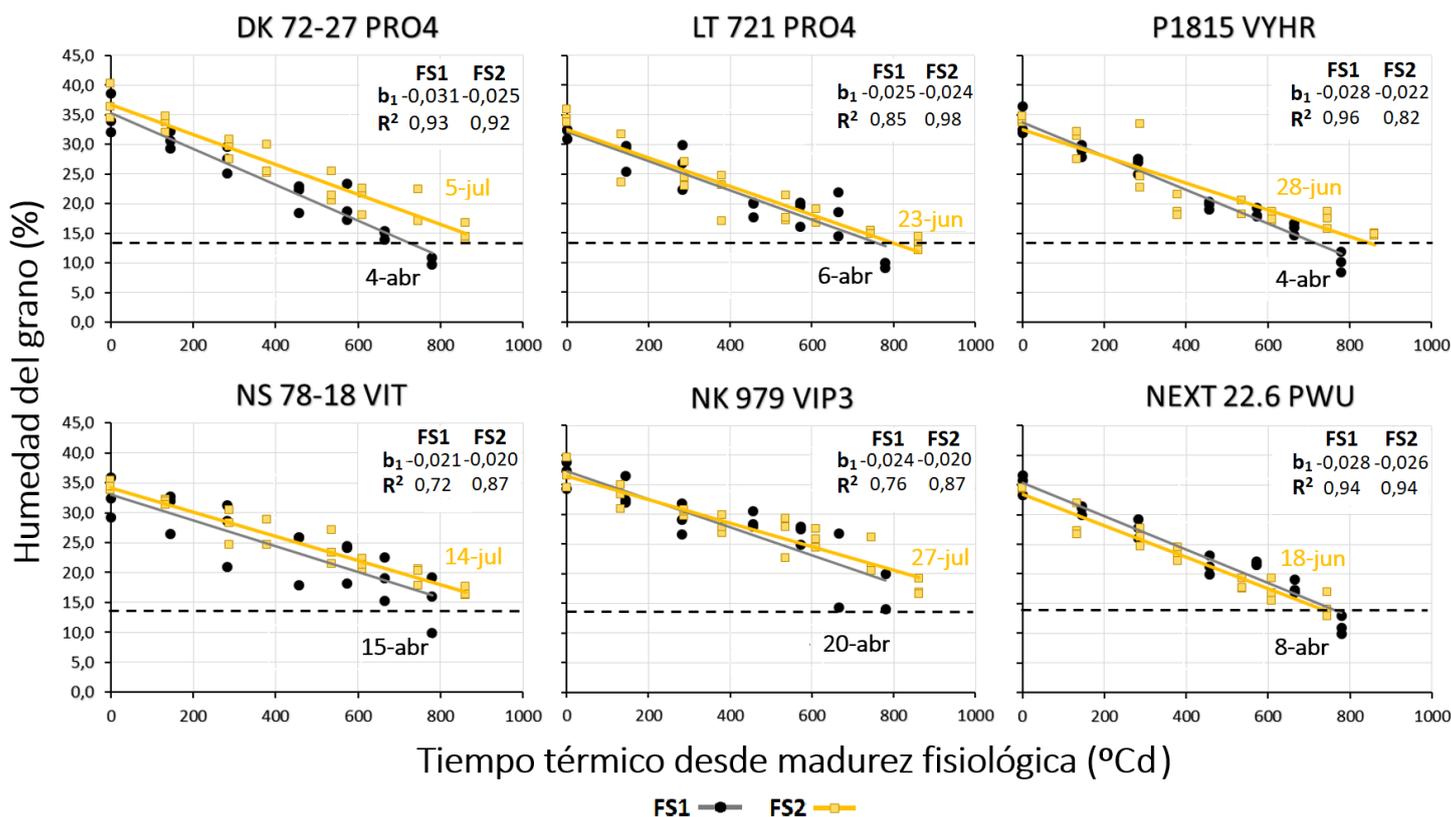


Figura 3. Evolución de la humedad del grano en función del tiempo térmico, para un conjunto de seis híbridos comerciales evaluados en fechas de siembra temprana (FS1) y tardía (FS2). Las fechas de cosecha están indicadas en color negro y amarillo para siembra temprana y tardía respectivamente. La línea punteada horizontal indica el valor de humedad comercial (14,5 %).

Las fechas de cosecha en humedad comercial (14,5 %) se encontraron en un rango comprendido entre el 4 y el 20 de abril para siembra temprana y entre el 18 de junio y el 27 de julio para siembra tardía (Tabla 2). Los días a humedad comercial se encontraron entre 38 y 101 días, presentándose interacción FS x híbrido ($p < 0,05$). Los híbridos no difirieron significativamente en los días a humedad comercial en siembra temprana (Tabla 2). En siembra tardía, los híbridos NEXT 22.6 PWU y LT 721 PRO4 (62 y 67 días a humedad comercial, respectivamente) difirieron significativamente de NS 78-18 VIT y NK 979 VIP3 (88 y 101 días a humedad comercial, respectivamente). El híbrido NK 979 VIP3 se diferenció significativamente también de P1815 VYHR y DK 72-27 PRO4 (72 y 79 días a humedad comercial, respectivamente).

6. DISCUSIÓN

El presente trabajo evaluó el impacto de la fecha de siembra, la elección del híbrido y su interacción (FS x híbrido) sobre el secado de los granos post - madurez fisiológica en el cultivo de maíz. Para ello, se evaluaron seis híbridos comerciales de maíz pertenecientes a distintas compañías semilleras actualmente disponibles en el mercado, en dos FS contrastantes (temprana y tardía).

Las FS evaluadas (15/10/2021 y 7/12/2021), expusieron a los híbridos a condiciones meteorológicas contrastantes durante todo su ciclo (Figura 1). En las FS tardías se registró un acortamiento en la duración media de la etapa vegetativa (S-R1) para todos los híbridos evaluados (72 y 59 días para siembra temprana y tardía respectivamente). Esta respuesta se debe a la mayor tasa de desarrollo a floración que presenta el cultivo de maíz por estar expuesto a mayores temperaturas durante su etapa vegetativa (+16 % respecto a FS temprana; Figura 1; Bonhomme *et al.* 1994, Cirilo y Andrade 1994, Otegui *et al.* 1995). Por otro lado, con el atraso de la FS se verificó una extensión del periodo de llenado de los granos (R1-MF; 60 y 73 días para siembra temprana y tardía respectivamente), como consecuencia de una disminución de la temperatura media explorada durante dicho periodo (-27 %, respecto a siembra temprana), respuesta que ha sido previamente documentada (Cirilo y Andrade 1994, Otegui *et al.* 2021). Las pequeñas diferencias entre híbridos en la duración del ciclo a R1 (6 y 5 días máximo entre el primer y el último híbrido en alcanzar el estado R1, para FS temprana y tardía respectivamente) y de R1 - MF (6 y 5 días de diferencia en la duración de la fase, entre híbridos, para FS temprana y tardía respectivamente) hicieron que, dentro de cada FS, todos ellos estuvieran expuestos a condiciones ambientales similares durante el secado de los granos post-MF. La similitud en la duración de las etapas fenológicas entre los diferentes híbridos, podría atribuirse al logro de la optimización en la duración y distribución del ciclo del cultivo (Corke y Kannenberg 1989) para siembras tempranas en la zona central de Argentina, que tuvo lugar en la década de 1990, respuesta que también ha sido reportada en estudios previos donde se analizan híbridos históricos (Amas *et al.* 2022, Chazarreta *et al.* 2021).

El atraso en la FS del cultivo de maíz hacia el mes de diciembre produjo una reducción significativa en las tasas medias de secado de los granos post-MF en relación a la siembra temprana (-46 % y -11 % expresadas en % día⁻¹ y en % °Cd⁻¹ respectivamente). Esta respuesta puede deberse, a que el periodo de secado de los granos post-MF en siembras tardías se situó en condiciones declinantes de radiación y temperatura con una leve caída del DPV, con respecto a la siembra temprana (Figura 1), condiciones climáticas que no favorecen la pérdida de humedad desde la superficie de los granos (Chazarreta *et al.* 2021, 2023). Los híbridos difirieron significativamente en sus tasas medias de secado del grano post-MF en función de los días y del TT ($p < 0,01$). Este resultado difiere de lo observado en estudios previos (Chazarreta 2018, Cavalieri y Smith 1985, Martínez-Feria *et al.* 2019) donde no se identificaron diferencias significativas en las tasas de secado post-MF entre híbridos. Esta discrepancia podría atribuirse a: i) diferencias genéticas que podrían existir en el pool de híbridos evaluados en cada uno de los estudios (serie histórica de híbridos de una misma compañía semillera en los estudios anteriores vs híbridos modernos de diferentes compañías semilleras en el presente); ii) la inclusión de FS tardía en el presente estudio y de una ventana más acotada de fechas de siembra evaluadas en los estudios previos (Martínez-Feria *et al.* 2019, Cavalieri y Smith 1985). Sin embargo, cuando el análisis se centra dentro de cada FS las diferencias en las tasas de secado post-MF tienden a desaparecer. En siembra temprana, sólo encontramos diferencias significativas entre los híbridos DK 72-27 PRO4 y NS 78-18 VIT, mientras que en siembras tardías los híbridos no difirieron significativamente en sus tasas de secado post-MF, lo que respalda lo observado en estudios previos (Chazarreta *et al.* 2021, Cavalieri y Smith 1985, Nielsen 2018). La ausencia de diferencias en las tasas de secado post-MF entre los híbridos en siembras tardías puede deberse a que el secado de los granos post-MF no ha sido un objetivo del mejoramiento genético en la región núcleo maicera de Argentina, ya que en las tradicionales siembras tempranas no se ha verificado una restricción para alcanzar la humedad comercial de cosecha (Otegui *et al.* 2002).

Con el atraso de la FS, se verificó una extensión de los días (+77 %) y el TT (+13 %) medio requeridos para alcanzar la humedad comercial (*i.e.* 14,5 %).

Esta extensión podría ser atribuida principalmente a la reducción significativa de las tasas de secado post-MF, que se registró con el atraso de la FS. Por otro lado, en siembras tempranas, los híbridos no difirieron significativamente en los días a humedad comercial (Tabla 2). Este comportamiento fue previamente documentado por Nielsen (2018), donde observa que cuando las condiciones climáticas imperantes favorecen el secado de los granos (*i.e.* altas temperaturas, baja humedad relativa y alta radiación solar; Chazarreta *et al.* 2021, 2023) los híbridos tienden a tener tasas y tiempos de secado similares. Por otro lado, cuando las condiciones meteorológicas no favorecen la pérdida de humedad desde la superficie del grano (*i.e.* bajas temperaturas, elevada humedad relativa y baja radiación solar incidente; Chazarreta *et al.* 2021, 2023), diferentes características de los híbridos asociadas al secado de los granos, que no fueron abordadas en este estudio, cobran mayor relevancia (Nielsen 2018), como por ejemplo, el número de chalas y su grosor, el ángulo de inserción de la espiga, la fecha de senescencia de la hoja de la espiga, la permeabilidad y el grosor del pericarpio de los granos (Baron y Daynard 1984, Cavalieri y Smith 1985, Prudy y Crane 1967, Troyer y Ambrose 1971). Trabajos futuros sobre la influencia de estos caracteres sobre el secado de los granos post-MF serían de gran importancia, particularmente en fechas de siembra tardías, que actualmente representan ~50 % del maíz cultivado en Argentina (Bolsa de cereales 2022).

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluó el efecto de las principales variables de manejo agronómico (*i.e.* elección de la FS y el híbrido) sobre el secado de los granos post-MF en el cultivo de maíz. El atraso de la FS hacia el mes de diciembre provocó una reducción de las tasas de secado de los granos post-MF, extendiendo el TT medio a humedad comercial (14,5 %), y verificándose un comportamiento diferencial de los híbridos entre FS para los días a humedad comercial. Por lo anteriormente expuesto, no se rechaza la hipótesis del presente trabajo donde se plantea que la FS del cultivo de maíz afecta el secado de los granos post-MF de manera diferencial según el genotipo considerado.

Estudios futuros podrían incluir el análisis del secado de los granos post-MF en un rango más amplio de FS, como así también, determinar la influencia de características morfo-fisiológicas de los híbridos (*e.g.* número de chalas y su grosor, fecha de senescencia de la hoja de la espiga, la permeabilidad y el grosor del pericarpio de los granos) sobre la pérdida de humedad de los granos post-MF. La identificación de caracteres asociados al secado de los granos podría ser útil en programas de mejoramiento, particularmente orientados a la obtención de híbridos adaptados a siembras tardías. Híbridos con mayores tasas de secado post-MF permitirían alcanzar el valor de humedad comercial de cosecha en una menor cantidad de días. Esto permitiría al productor realizar una cosecha anticipada, evitando las pérdidas de rendimiento y calidad, que se dan como consecuencia de mantener el cultivo en pie en el campo durante varios meses.

8. BIBLIOGRAFÍA

Afuakwa, JJ; Crookston, RK. 1984. Using the kernel milk line to visually monitor grain maturity in maize. *Crop Science*. 24: 687–691.

Amas, JI; Fernandez, JA; Curin, F; Cirilo, AG; Ciampitti, IA; Otegui, ME. 2022. Maize genetic progress in the central Pampas of Argentina: effects of contrasting sowing dates. *Field Crops Research*. 281, 108492.

Andrade, FH; Ferreiro MA. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Research*. 48: 155-165.

Baron, VS; Daynard, TB. 1984. Factors affecting grain dry-down in early-maturing European and Canadian corn hybrids. *Canadian Journal of Plant Science*. 64(3): 465-474.

Bolsa de Cereales. 2022. Informe cierre de campaña maíz 2021/2022. URL: <https://www.bolsadecereales.com> (Accedido el 1.08.2023).

Bonelli, LE; Monzón JP; Cerrudo, A; Rizalli, RH; Andrade, FH. 2016. Maize grain yield components and source-sink relationships as affected by the delay in sowing date. *Field Crop Research*. 198: 215-225.

Bonhomme, R; Derieux, M; Edmeades, G. 1994. Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multi-location field trials. *Crop Science*. 34: 156–164.

Borrás, L; Slafer, GA; Otegui, ME. 2004. Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*. 86: 131–146.

Brooking, IR. 1990. Maize ear moisture during grain-filling, and its relation to physiological maturity and grain-drying. *Field Crops Research*. 23: 55-68.

Cavaliere, AJ; Smith, OS. 1985. Grain filling and field drying of a set of maize hybrids released from 1930 to 1982. *Crop Science*. 25(5): 856-860.

Cerrudo, A; Di Matteo, J; Fernández, E; Robles, M; Pico, LO; Andrade, FH. 2013. Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop and Pasture Science* 64(6): 580–587.

Connor, DJ; Loomis, RS; Cassman, KG. 2011. *Crop Ecology: productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press.

Chazarreta, YD. 2018. Mejoramiento genético en maíz: efectos sobre los determinantes fisiológicos del llenado y secado del grano en híbridos comerciales cultivados en fechas de siembra contrastantes. Tesis Licenciatura en Genética. Pergamino, Argentina, UNNOBA. 46 p.

Chazarreta, YD; Amas, JI; Otegui, ME. 2021. Kernel filling and desiccation in temperate maize: Breeding and environmental effects. *Field Crops Research*. 271, 108243.

Chazarreta, YD; Carcedo, AJ; Prado, SA; Massigoge, I; Amas, JI; Fernandez, JA; Otegui, ME. 2023. Enhancing maize grain dry-down predictive models. *Agricultural and Forest Meteorology*. 334, 109427.

Cirilo, AG; Andrade, F. 1994. Sowing date and maize productivity: crop growth and dry matter partitioning. *Crop Science*. 34: 1039–1043.

Corke, H; Kannenberg, LW. 1989. Selection for vegetative phase and actual filling period duration in short season maize. *Crop Science*. 29: 607-612.

Daynard, TB; Duncan, WG. 1969. The black layer and grain maturity in Corn. *Crop Science*. 9: 473–476.

Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, CW. 2011. *InfoStat versión 2011*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL: <https://www.infostat.com.ar>

FADA (Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina) 2022. Monitor de exportaciones agroindustriales. Año 2021. Río Cuarto, Argentina. URL: <https://fundacionfada.org/> (Accedido el 10.06.2022).

Ferraguti, F; Castellarín, J; Papa, JC; Mendez, JM; Cristos, D; Moschini, R. 2016. Determinación del momento óptimo de cosecha en maíz tardío. Evolución del rendimiento, calidad e inocuidad de granos durante el secado a campo. Reporte técnico, INTA Oliveros, Santa Fe, Argentina.

Fischer, KS; Palmer, FE. 1984. Tropical maize. In: Goldsworthy, PR; Fischer, NM (eds). The physiology of tropical field crops. Chichester, Wiley. 213–248.

Hall, AJ; Rebella, CM; Ghera, CM; Culot, JP. 1992. Field-crop system of the Pampas. In: Pearson, CJ (ed). Ecosystems of the world. Amsterdam, Elsevier. 18: 413–450.

Maddoni, GA. 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.

MAGYP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca) 2022. Buenos Aires, Argentina. URL: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> (Accedido el 26.7.2022).

Martinez-Feria, RA; Litch, MA; Ordoñez, RA; Hatfield, JL; Coulter, JA; Archontoulis, SV. 2019. Evaluating maize and soybean grain dry-down in the field with predictive algorithms and genotype-by-environment analysis. Scientific Reports. 9: 1-13.

Mercau, JL; Otegui, ME. 2014. A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat–maize in the rainfed pampas region of Argentina. Advances in Agricultural Systems Modeling. 5: 351- 373.

Muchow, RC. 1990. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. Field Crops Research. 23:145-158.

Nielsen, RL. 2018. Field dry down of mature corn grain. Corny News Network - Purdue University. URL: <https://extension.entm.purdue.edu/newsletters/pestandcrop/article/field-drydown-of-mature-corn-grain/> (Accedido el 5.06.2023).

Otegui, ME; Nicolini, MG; Ruiz, RA; Dodds, PA. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*. 87: 29-33.

Otegui, ME; Ruiz, RA; Petruzzi, D. 1996 Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Research*. 47: 167-174.

Otegui, ME; Mercau, J; Menéndez, F. 2002. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. Guía Dekalb del cultivo de maíz. In: Satorre, EH (ed). Dekalb, 293.

Otegui, ME; Riglos, M; Mercau, JL. 2021. Genetically modified maize hybrids and delayed sowing reduced drought effects across a rainfall gradient in temperate Argentina. *Journal of Experimental Botany*. 1-9.

Parsons, MW; Munkvold, GP. 2010. Associations of planting date, drought stress, and insects with *Fusarium* ear rot and fumonisin B₁ contamination in California maize. *Food Additives & Contaminants*. 27(5): 591-607.

Prudy, JL; Crane, PL. 1967. Influence of pericarp on differential drying rate in "mature" corn (*Zea mays* L.). *Crop Science*. 7: 379-381.

Ritchie, JT; Nesmith, DS. 1991. Temperature and crop development. In: Hanks, J; Ritchie, JT (eds). Modelling plant and soil systems, Agronomy Series 31. ASA-CSSA-SSSA, Madison, pp. 5–29.

Ritchie, SW; Hanway, JJ. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Special Report (48).

Troyer, AF; Ambrose, WB. 1971. Plant characteristics affecting field drying rate of ear corn. *Crop Science*. 11: 529-531.

Williams, WP; Sagers, JB; Hanten, JA; Davis, FM; Buckley, PM.
1997. Transgenic corn evaluated for resistance to fall armyworm and
southwestern corn borer. *Crop Science*. 37: 957-962.