



**MAÍZIFICANDO
CONCIENCIA**
XII CONGRESO NACIONAL DE MAÍZ

Eje

Ecofisiología y manejo del cultivo

8, 9 y 10 de Noviembre
Pergamino, BA
UNNOBA



Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Ministerio de Economía
Argentina

2022





EFECTOS DEL MEJORAMIENTO EN AMBIENTES CONTRASTANTES SOBRE LOS COMPONENTES DEL DESARROLLO REPRODUCTIVO ASOCIADOS A LA FIJACIÓN DE GRANOS EN MAÍZ

Rossini, M.A.^{1,2}; Curin, F.¹; Otegui, M.E.^{3,4}

¹ Centro de Investigaciones y Transferencias del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (CITNOBA-CONICET-UNNOBA-UNSADA), Argentina

² Departamento de Ciencias Básicas y Experimentales, UNNOBA.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) en INTA, Centro Regional Buenos Aires Norte, Estación Experimental Pergamino, INTA, Argentina

⁴ Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina
mdlarossini@comunidad.unnoba.edu.ar; facundo_curin@hotmail.com; otegui@agro.uba.ar

BREEDING EFFECTS UNDER CONTRASTING ENVIRONMENTS ON EAR REPRODUCTIVE DEVELOPMENT COMPONENTS ASSOCIATED WITH KERNEL SET IN MAIZE

Abstract

The aim of the current research was to study breeding effects on maize (*Zea mays* L.) ear reproductive developmental traits associated to kernel number per ear (KNE) under a wide range of growing conditions per plant. Field experiments were conducted at two sites of the Central Pampas of Argentina and hybrids of different years of release (from 1980 to 2012) were evaluated under 10 managed environments generated by the non-factorial combination of (i) three growing seasons (2015-16, 2017-18 and 2018-19), (ii) two nitrogen rates (N0: no nitrogen added; N200: 200 kg N ha⁻¹), and (iii) two stand densities in 2015-16 and 2017-18 (9 and 12 plants m⁻²) and only one in 2015-16 (9 plants m⁻²). Under high growth environments, the KNE improvement (4.40 kernels year⁻¹) was the result of a greater number of completely developed florets (7.31 florets year⁻¹) and more exposed silks per ear (5.81 silks year⁻¹). Under low growth environments, the genetic gain in KNE (2.41 kernels year⁻¹) was associated with a lower % kernel abortion (-0.48 % year⁻¹). This finding highlights the relevance of focusing on processes related to the reduction in kernel abortion under stress-prone environments to improve grain yield.

Palabras claves

Desarrollo reproductivo; maíz; progreso genético; estrés; rendimiento en grano

Keywords

Reproductive development; maize; genetic progress; stress; grain yield



Introducción

El mejoramiento genético ha sido el responsable de una proporción importante de la ganancia de rendimiento en grano (RG) en el cultivo de maíz, con estimaciones que le atribuyen hasta un 50% de dicha ganancia (Duvick, 2005; Liu et al., 2021). Esta respuesta estuvo acompañada de un incremento sostenido en la tolerancia a estreses abióticos que reducen la disponibilidad de recursos por planta (Tollenaar y Lee, 2002), tales como el agua (Nagore et al., 2017), nitrógeno (Haegele et al., 2013), y alta densidad de plantas (Duvick, 2005). Los estudios retrospectivos, donde se evalúan híbridos de diferente año de liberación al mercado (ALM) bajo las mismas condiciones ambientales, han sido una de las herramientas utilizadas para la interpretación de los efectos del mejoramiento sobre el RG (Duvick, 2005). Estos tipos de estudios permiten la identificación de los rasgos secundarios asociados con el RG factibles de ser mejorados, optimizando de esta manera el proceso de mejora genética (Araus et al., 2008).

Varios estudios realizados en maíz han identificado al número de granos por unidad de área (NG) como el principal responsable de los aumentos de RG producto de la mejora genética tanto en Argentina (Amas et al., 2022; Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018; Di Matteo et al., 2016) como en Canadá y EEUU (Russel, 1984; Tollenaar and Wu, 1999). El NG es la resultante del número de espigas por unidad de superficie (dependiente de la densidad y la prolificidad) y del número de granos fijados por espiga (NGE), el cual se define en una ventana temporal de 30 días centrados en la floración femenina (Cerrudo et al., 2013; Otegui y Bonhomme, 1998). Desde la perspectiva del desarrollo reproductivo de la espiga, el NGE es definido por el número de flores completamente desarrolladas por espiga (FCDE, aquellas con estigma > 1 mm), la proporción de flores que exponen sus estigmas por fuera de las chalas para ser fertilizadas por polen fresco, y finalmente, la proporción de estigmas fecundados que fijan granos (Otegui y Andrade, 2000). El número de FCDE y de estigmas expuestos por espiga (EEE) han sido identificados como los responsables del incremento del NGE en Argentina (Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018; Cagnola et al., 2021), mientras que en Canadá dicho aumento fue consecuencia de una mejora en la proporción de NGE por EEE (i.e., una reducción del aborto de granos, Gonzalez et al., 2020). El aumento del número de FCDE y de EEE observado en Argentina pueden explicar el incremento del RG bajo condiciones de alta disponibilidad de recursos por planta registrado en este país (Luque et al., 2006) y que no se han registrado en otros (Duvick y Cassman, 1999; Lee y Tollenaar, 2007). Por otro lado, los beneficios de una reducción en el aborto de granos en híbridos modernos canadienses pueden explicarse por una mejora en la tolerancia a condiciones baja disponibilidad de recursos por planta (Tollenaar y Lee, 2002).

Los estudios retrospectivos asociados a rasgos del desarrollo reproductivo en Argentina han sido llevados a cabo en condiciones no limitantes al crecimiento (Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018; Cagnola et al., 2021) pese a que gran parte de la producción de maíz en Argentina es comúnmente expuesta a estreses de nitrógeno o estrés hídrico durante el período crítico (Otegui et al., 2021). Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue estudiar los efectos del mejoramiento genético en el RG de maíz y sus rasgos del desarrollo reproductivo asociados al NGE en un rango de condiciones de crecimiento generado por la combinación no-factorial de diferentes años de evaluación, niveles de disponibilidad de nitrógeno y densidades de plantas. Como hipótesis de trabajo se planteó que la mejora en el RG por planta, asociado a un mayor NGE, se relacionó con (i) un aumento del número de FCDE en condiciones de alta disponibilidad de recursos por planta, y (ii) un menor aborto de granos en condiciones de bajos recursos por planta.



Materiales y Métodos

Durante las campañas 2015-16 y 2017-18 en la EEA INTA Pergamino (33°56'S; 60°33'W) y 2018-19 en el Campo Experimental UNNOBA localizado en Junín (34°56'S 60°56'W), se evaluó un grupo de 4 híbridos simples de diferente año de liberación al mercado (ALM; Tabla 1) en 10 ambientes contrastantes de disponibilidad de recursos por planta. Los mismos fueron obtenidos por la combinación no factorial de (i) tres campañas de evaluación (2015-16, 2017-18 y 2018-19), (ii) dos niveles de nitrógeno (N0: sin fertilizar; N200: 200 kg N ha⁻¹ aplicado en V6), y (iii) dos densidades en 2015-16 y 2017-18 (9 y 12 plantas m⁻²) y una en 2018-19 (9 plantas m⁻²). Las fechas de siembra fueron a mediados de octubre durante las dos primeras campañas y a principios de diciembre durante la última. Todos los experimentos tuvieron un adecuado control de insectos, malezas, y enfermedades para garantizar las mermas de RG producto de agentes bióticos, mientras solamente se utilizó riego complementario durante la campaña 2017-18 para garantizar la no ocurrencia de estrés hídrico.

Tabla 1. Híbridos evaluados y campañas de evaluación

HÍBRIDOS	ALM	TIPO DE ENDOSPERMA	CAMPAÑA
DK 2F10	1980	FLINT	TODAS
DK 664	1993	FLIN × DENT	2017-18 y 2018-19
DK 190	2003	DENT	TODAS
DK 72-10	2012	DENT	TODAS

En cada parcela, se marcaron 18 plantas consecutivas por parcela en estadíos iniciales de crecimiento. En 9 de ellas se estimó: (i) la biomasa por planta en R1 (BP_{R1}) mediante la utilización de modelos alométricos no destructivos basados en la relación entre la biomasa de la planta y variables morfométricas (Borrás y Otegui, 2001; Vega et al., 2000) y (ii) el RG, el NG y el peso individual de los granos (PIG) por planta mediante muestreos destructivos en R6. Debido a que las espigas subapicales nunca aparecieron, el RG y el NG por planta estuvo explicado por el rendimiento (RGE) y el número de granos (NGE) de la espiga apical. En las 9 plantas restantes se determinaron los componentes del desarrollo reproductivo de la espiga (i.e., FCDE y EEE) mediante muestreos destructivos a los 5 días posteriores a R1 de cada planta. En cada espiga se identificaron dos categorías de flores a lo largo de dos hileras opuestas de la espiga: (i) flores con estigmas expuestos por fuera de las chalas, (ii) flores con estigma > 1mm pero no expuestos (flores completamente desarrolladas; Otegui y Melon, 1997). Cada una de estas categorías se cuantificó a nivel de espiga multiplicando el número de flores por hilera y el número total de hileras de la espiga. Finalmente, entre los promedios por planta de ambos muestreos, se establecieron las fuentes de pérdida del NGE: (i) la pérdida de estigmas representada por la proporción de flores por espiga que no emitieron estigmas por fuera de las chalas (i.e., aborto de estigma), y (ii) la pérdida de granos representada por la proporción de estigmas expuestos que no fijaron granos (i.e., aborto de granos).

La BP_{R1} fue utilizada como un carácter integrador del crecimiento temprano ya que el desarrollo floral y el NGE son determinados durante este estadío (Otegui y Andrade, 2000). A través de un ANOVA combinando el ambiente y los híbridos como variables de efectos fijos de acuerdo a la ecuación 1 se pudo identificar 4 grupos de ambientes contrastantes según la BT_{R1} (Tabla 2).

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{j(i)+} + \gamma_k + (\alpha \times \gamma)_{ik} + [\beta \times \alpha]_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

(ecuación 1)



donde μ es la gran media; α_i es el efecto del i -ésimo ambiente ($i = 10$); β_j (i) es el efecto del j -ésimo bloque anidado dentro de cada ambiente ($j = 3$), γ_k es el efecto del k -ésimo ALM de cada híbrido ($k = 4$). El término $(\alpha\gamma)_{ik}$ corresponde a la interacción ambiente por ALM del híbrido; $[\beta \times \gamma]_{ij}$ es el error tipo a y ϵ_{ijk} es el error tipo b.

En cada uno de dichos grupos, la respuesta de los rasgos al ALM fue evaluado utilizando análisis de regresión lineal, con los cuales se estimó el progreso genético absoluto (i.e., la pendiente) y el porcentual (i.e. cociente entre la pendiente y los valores medios) para cada ambiente identificado.

Tabla 2. Valores medios y resultado del ANOVA para la biomasa por planta en R1 (BPR₁)

AMBIENTES	BPR ₁ (g pl ⁻¹)	GRUPO AMBIENTAL	
2015-16-N0-D12	62,25	a	BAJO
2017-18-N0-D12	63,63	a	BAJO
2015-16-N0-D9	69,30	a	BAJO
2017-18-N200-D12	81,48	b	MEDIO-BAJO
2015-16-N200-D12	86,54	b	MEDIO-BAJO
2017-18-N0-D9	88,23	b	MEDIO-BAJO
2015-16-N200-D9	91,43	b	MEDIO-BAJO
2017-18-N200-D9	109,34	c	MEDIO-ALTO
2018-19-N0-D9	151,43	d	ALTO
2018-19-N200-D9	158,23	d	ALTO
<i>P</i>	<0.0001		
HÍBRIDO			
<i>P</i>	0.25		
AMBIENTE x HÍBRIDO			
<i>P</i>	0.6218		

N: nivel de nitrógeno (N0: sin fertilizar, N200: fertilizado con 200 kg ha N en V6)
D: densidad de planta (D9: 9 pl m⁻², D12: 12 pl m⁻²)

Los ambientes del grupo ambiental BAJO presentaron los menores valores FCDE y EEE siendo un 23 y 31 % menor que los registrados en los ambientes del grupo ALTO. Lo mismo ocurrió con el RG y sus componentes numéricos los cuales tuvieron 59, 16 y 65 % menos de NGE, PIG y RGE que los ambientes del grupo ALTO. Además, en los ambientes del grupo ALTO se registraron menor pérdida de estigmas (11,9 % vs 20,5 %, respectivamente) y aborto de granos (17,8 % vs 51,2 %, respectivamente) que en los ambientes del grupo BAJO (Tabla 3).

Tabla 3. Valores medios, mínimos y máximos de cada uno de los caracteres evaluados en cada uno de los grupos ambientales.

		BPR ₁ *	FCDE	EEE	NGE	RGE	PIG	PÉRDIDA	ABORTO
		g pl ⁻¹	n° esp ⁻¹	n° esp ⁻¹	n° esp ⁻¹	g esp ⁻¹	mg	ESTIGMAS %	GRANOS %
BAJO	Media	64.9	502	399	194	43.8	224	20.5	51.2
	Min.	44.9	381	226	70	15.1	139	2.30	25.3
	Max.	77.4	643	507	307	75	256	40.7	75.1
MEDIO-BAJO	Media	86.6	584	494	324	74.2	228	15.3	34.3
	Min.	65	425	325	196	44.3	168	5.9	12.7
	Max.	107	752	619	492	117.6	217	24.7	54.5
MEDIO-ALTO	Media	109.4	650	551	456	98.8	217	15.1	16.7
	Min.	97.5	481	411	310	72.9	184	11.1	0.0
	Max.	133	812	686	526	120.6	241	22.1	34.0
ALTO	Media	154.7	653	575	473	126.3	268	11.9	17.8
	Min.	135.3	441	393	339	81.2	225	6.4	8.8
	Max.	179.8	773	675	579	170.9	320	16.8	32.2

* BPR₁: biomasa total por planta en R1, EEE: estigmas expuesto por espiga, FCDE: flores completamente desarrolladas por espiga, NGE: número de granos por espiga, PIG: peso individual de granos, RGE: rendimiento en grano por espiga.



Diferentes efectos del mejoramiento genético se han registrado en los componentes del desarrollo reproductivo de la espiga entre los diferentes ambientes agrupados (Figura 1). Por un lado, en casi todos los grupos ambientales se observó un efecto significativo de la mejora en el número de FCDE (Figura 1b-c) y de EEE (Figura 1e-f) con excepción de este último en los ambientes del grupo BAJO. Los valores de progreso genético tendieron a incrementarse a medida que mejoró la calidad ambiental desde 5,42 FCDE año⁻¹ en el grupo ambiental BAJO a 7,55 FCDE año⁻¹ en el ALTO y 3,66 EEE año⁻¹ en el grupo MEDIO-BAJO a 6,01 EEE año⁻¹ en el ALTO. Los efectos no significativos en el número de EEE en los ambientes del grupo BAJO estarían parcialmente explicados por un incremento en la proporción de pérdida de estigmas con el ALM (0,34 % año⁻¹, Figura 1a).

Tanto el RGE (Figura 1j-k), como su principal componente numérico (i.e., NGE; Figura 1g-e) incrementaron con el ALM en todos los grupos ambientales evaluados. Como lo registrado para los componentes del desarrollo reproductivo de la espiga, los valores de progreso genético se incrementaron a medida que aumentó la calidad ambiental con valores que variaron desde 0,63 g m⁻² año⁻¹ o 2,41 NGE año⁻¹ en los ambientes del grupo BAJO a 1,13 g m⁻² año⁻¹ o 4,53 NGE año⁻¹ en el grupo ALTO. Finalmente, es de destacar que las mejoras en el NGE en el grupo BAJO estuvieron asociados a una reducción en la tasa de aborto con el ALM (-0.48 % año⁻¹, Figura 1d) ya que el número de EEE resultó invariable (Figura 1e-f).

Discusión y Conclusiones

Hasta el momento, pocos estudios han analizado los efectos del mejoramiento sobre los rasgos del desarrollo reproductivo de la espiga de maíz y adicionalmente los mismos se han llevado a cabo en condiciones sin limitaciones al crecimiento (Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018; Cagnola et al., 2021). Sin embargo, la mayor parte de los cultivos de maíz bajo producción exploran diferentes restricciones abióticas durante el ciclo que pueden afectar el RG. Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue estudiar los efectos del mejoramiento genético en el RG de maíz, los rasgos del desarrollo reproductivo asociados al mismo y las fuentes de pérdida del NGE en un rango amplio de disponibilidad de recursos por planta.

La mejora en el RGE registradas en todos los ambientes concuerda con lo registrado por estudios de progreso genético del RG en rangos amplios de condiciones ambientales (Curin et al., 2020). Esto refuerza la idea de que los beneficios de la selección de genotipos en condiciones potenciales se trasladan hacia los ambientes de bajos recursos, particularmente cuando paralelamente se selecciona por estabilidad del RG en ensayos multiambientales (Di Matteo et al., 2016). Similarmente, el NGE también mejoró producto del ALM en todos los ambientes en coincidencia a lo registrado por estudios previos en condiciones no limitantes (Amas et al., 2022; Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018; Cagnola et al., 2021; Di Matteo et al., 2016).

Los rasgos del desarrollo reproductivo de la espiga tuvieron diferentes tendencias dependiendo el ambiente analizado. Por ejemplo, en los ambientes del grupo ALTO, el progreso genético del NGE fue el resultado de un mayor número de FCDE y de EEE. Esta respuesta está de acuerdo con la hipótesis planteada “*el mayor NGE en los ambientes de altos recursos está asociado a un mayor número de FCDE*”. Estos resultados concuerdan con lo registrado en condiciones no limitantes reportadas por estudios retrospectivos previos (Borrás y Vitantonio-Mazzini, 2018, Cagnola et al., 2021).

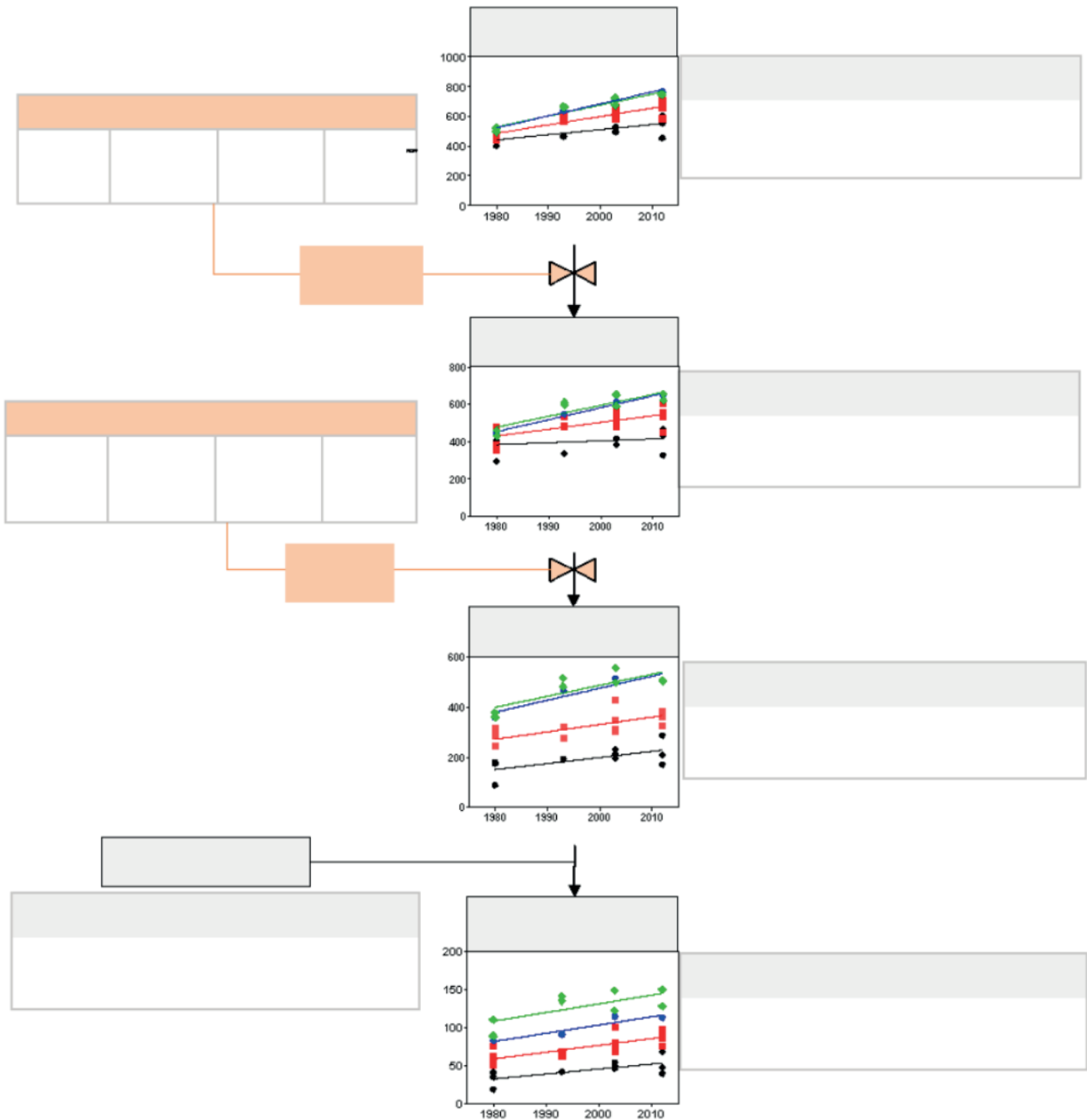


Figura 1. Diagrama de los componentes del desarrollo reproductivo de la espiga y de los componentes numéricos del rendimiento en grano. Cada sub-figura representa la respuesta de cada carácter al año de liberación al mercado (ALM) en los ambientes clasificados como BAJO (círculos negros), MEDIO-BAJO (cuadrados rojos), MEDIO-ALTO (círculo azul) y ALTO (rombo verde): (b) FCDE, flores completamente desarrolladas por espiga, (e) estigmas expuestos por espiga, (g) NGE número de granos por espiga, (j) rendimiento por espiga. Las tablas en gris indican los valores de progreso genético de los componentes numéricos del RGE y de los componentes del desarrollo reproductivo de la espiga y en naranja el progreso genético sobre las fuentes de pérdida de estigma y granos

El mayor número de FCDE indica el impacto del mejoramiento en etapas tempranas del ciclo (estadío de diferenciación de flores) como resultado de una mayor tasa y/o duración de diferenciación de flores (Derieux et al., 1983; Duburcq et al., 1983; Edmeades et al., 1993), sin efectos en el tiempo térmico a R1 (datos no mostrados). El mayor número de FCDE y consecuentemente de EEE y NGE se podría explicar a que en los ambientes de alto crecimiento, el rango de disponibilidad de asimilados por flor no limitó la emergencia de estigmas (pérdida de estigmas) ni aumentó el aborto de granos (Rossini et al., 2012).



En los peores ambientes (BAJO), la mejora en FCDE no se reflejó en un mayor número de EEE producto de un aumento de la pérdida de estigmas con el ALM. A priori, se podría inferir que la reducción en la pérdida de estigmas debería implicar una dinámica de emergencia más sincrónica asociada positivamente a una mayor fijación de granos. Esta respuesta es observada en situaciones sin restricciones al crecimiento (Carcova et al., 2000; Shen et al., 2018). En condiciones restrictivas, el tiempo entre la polinización de las sucesivas cohortes de estigmas aumenta (Basseti y Westgate, 1993; DeBruin et al., 2018) al igual que el número de ovarios que no logran la mínima disponibilidad de asimilados para lograr un grano (Charles-Edwards, 1984). Esto produce un aumento en la tasa de aborto de granos. Así, nuestra hipótesis “una mejora en el NGE en los ambientes de bajos recursos está asociado a un menor aborto de granos” no fue rechazada. La regulación de número de estructuras polinizables podría ser un rasgo conservativo que asegure el éxito de establecer granos de los estigmas emergidos, en coincidencia con lo reportado previamente en la relación negativa entre el aborto de granos y la pérdida de estigmas en un set de híbridos bajo diferentes disponibilidades de N (Rossini et al., 2020). La cuantificación del aborto de granos, así como la identificación de los genes responsables de la variación genotípica en este rasgo, podrían ayudar a los esfuerzos del mejoramiento en ambientes limitantes.



Referencias bibliográficas

- Amas, J.I., Fernandez, J.A., Curin, F., Cirilo, A.G., Ciampitti, I.A., Otegui, M.E., 2022. Maize genetic progress in the central Pampas of Argentina: effects of contrasting sowing dates. *Field Crops Res.* 281, 108492. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108492>
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Royo, C., Serret, M.D., 2008. Breeding for Yield Potential and Stress Adaptation in Cereals. *Crit. Rev. Plant Sci.* 27, 377–412. <https://doi.org/10.1080/07352680802467736>
- Bassetti, P., Westgate, M.E., 1993. Emergence, Elongation, and Senescence of Maize Silks. *Crop Sci.* 33, 271. <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300020011x>
- Borrás, L., Otegui, M.E., 2001. Maize Kernel Weight Response to Postflowering Source – Sink Ratio. *Crop Sci.* 1816–1822. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.1816>
- Borrás, L., Vitantonio-Mazzini, L.N., 2018a. Maize reproductive development and kernel set under limited plant growth environments. *J. Exp. Bot.* 69, 3235–3243. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx452>
- Borrás, L., Vitantonio-Mazzini, L.N., 2018b. Maize reproductive development and kernel set under limited plant growth environments. *J. Exp. Bot.* 69, 3235–3243. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx452>
- Cagnola, J.I., Parco, M., Rotili, D.H., Ploschuk, E.L., Curin, F., Amas, J.I., Luque, S.F., Maddonni, G.A., Otegui, M.E., Casal, J.J., 2021. Artificial selection for grain yield has increased net CO₂ exchange of the ear leaf in maize crops. *J. Exp. Bot.* 72, 3902–3913. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab119>
- Carcova, J., Uribealrea, M., Borrás, L., Otegui, M.E., Westgate, M.E., 2000. Synchronous pollination within and between ears improves kernel set in maize. *CROP Sci.-MADISON-* 40, 1056–1061.
- Cerrudo, A., Di Matteo, J., Fernandez, E., Robles, M., Pico, L.O., Andrade, F.H., 2013. Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop Pasture Sci.* 64, 580. <https://doi.org/10.1071/CP13201>
- Charles-Edwards, D.A., 1984. On the ordered development of plants 1. An hypothesis. *Ann. Bot.* 53, 699–707.
- Curin, F., Severini, A.D., González, F.G., Otegui, M.E., 2020. Water and radiation use efficiencies in maize: Breeding effects on single-cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012. *Field Crops Res.* 246, 107683. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107683>
- DeBruin, J.L., Hemphill, B., Schussler, J.R., 2018. Silk Development and Kernel Set in Maize as Related to Nitrogen Stress. *Crop Sci.*
- Derieux, M., Duburcq, J.-B., Bonhomme, R., Ruget, F., Vincourt, P., 1983. INFLUENCE DU GENOTYPE ET DU LIEU SUR LE NOMBRE D'OVULES PRESENTS A LA FLORAISON CHEZ LE MAIS. *Can. J. Plant Sci.* 63, 371–375. <https://doi.org/10.4141/cjps83-042>
- Di Matteo, J.A., Ferreyra, J.M., Cerrudo, A.A., Echarte, L., Andrade, F.H., 2016. Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding. *Field Crops Res.* 197, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.023>
- Duburcq, J.-B., Bonhomme, R., Derieux, M., 1983. Durée des phases végétative et reproductrice chez le maïs. Influence du génotype et du milieu. *Agronomie* 3, 941–946. <https://doi.org/10.1051/agro:19831001>
- Duvick, D.N., 2005. GENETIC PROGRESS IN YIELD 10.



- Duvick, D.N., Cassman, K.G., 1999. Post-Green Revolution Trends in Yield Potential of Temperate Maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39, 1622–1630. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961622x>
- Edmeades, G.O., Bolaños, J., Hernández, M., Bello, S., 1993. Causes for Silk Delay in a Lowland Tropical Maize Population. *Crop Sci.* 33, 1029–1035. <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300050031x>
- Gonzalez, V.H., MacKenzie, J.O., Tollenaar, M., Lee, E.A., 2020. Physiological mechanisms underlying genetic improvement in sink establishment and plant-to-plant variability in Maize. *Crop Sci.* csc2.20436. <https://doi.org/10.1002/csc2.20436>
- Haegerle, J.W., Cook, K.A., Nichols, D.M., Below, F.E., 2013. Changes in Nitrogen Use Traits Associated with Genetic Improvement for Grain Yield of Maize Hybrids Released in Different Decades. *Crop Sci.* 53, 1256–1268. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.07.0429>
- Lee, E.A., Tollenaar, M., 2007. Physiological Basis of Successful Breeding Strategies for Maize Grain Yield. *Crop Sci.* 47, S-202-S-215. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0010IPBS>
- Liu, G., Yang, H., Xie, R., Yang, Y., Liu, W., Guo, X., Xue, J., Ming, B., Wang, K., Hou, P., Li, S., 2021. Genetic gains in maize yield and related traits for high-yielding cultivars released during 1980s to 2010s in China. *Field Crops Res.* 270, 108223. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108223>
- Luque, S.F., Cirilo, A.G., Otegui, M.E., 2006. Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. *Field Crops Res.* 95, 383–397. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.04.007>
- Nagore, M.L., Della Maggiora, A., Andrade, F.H., Echarte, L., 2017. Water use efficiency for grain yield in an old and two more recent maize hybrids. *Field Crops Res.* 214, 185–193.
- Otegui, María E., Andrade, F.H., 2000. New relationships between light interception, ear growth, and kernel set in maize. *Physiol. Model. Kernel Set Maize* 89–102.
- Otegui, M.E., Bonhomme, R., 1998. Grain yield components in maize I. Ear growth and kernel set 10.
- Otegui, M.E., Cirilo, A.G., Uhart, S.A., Andrade, F.H., 2021. Maize, in: *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. Elsevier, pp. 2–43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00001-3>
- Otegui, M.E., Melon, S., 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize: I. Sowing date effects. *Crop Sci.* 37, 441–447.
- Rossini, M.A., Hise, I.R., Otegui, M.E., D'Andrea, K.E., 2020. Heterosis and parent–progeny relationships for silk extrusion dynamics and kernel number determination in maize: Nitrogen effects. *Crop Sci.* 60, 961–976. <https://doi.org/10.1002/csc2.20123>
- Rossini, M.A., Maddonni, G.A., Otegui, M.E., 2012. Inter-plant variability in maize crops grown under contrasting Nxstand density combinations: Links between development, growth and kernel set. *Field Crops Res.* 133, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.010>
- Russel, W.A., 1984. Agronomic performance of maize cultivars representing different eras of breeding.
- Shen, S., Zhang, L., Liang, X.-G., Zhao, X., Lin, S., Qu, L.-H., Liu, Y.-P., Gao, Z., Ruan, Y.-L., Zhou, S.-L., 2018. Delayed pollination and low availability of assimilates are major factors causing maize kernel abortion. *J. Exp. Bot.* 69, 1599–1613. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery013>
- Tollenaar, M., Lee, E.A., 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 75, 161–169. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00024-2)



Tollenaar, M., Wu, J., 1999. Yield Improvement in Temperate Maize is Attributable to Greater Stress Tolerance. *Crop Sci.* 39, 1597–1604. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961597x>

Vega, C.R.C., Sadras, V.O., Andrade, F.H., Uhart, S.A., 2000. Reproductive allometry in soybean, maize and sunflower. *Ann. Bot.* 85, 461–468. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.1084>