

DINÁMICA DE EMERGENCIA DE ESTIGMAS Y SU RELACIÓN CON EL ABORTO REPRODUCTIVO EN HÍBRIDOS DE MAÍZ (*ZEAMAYS L.*) BAJO DIFERENTES AMBIENTES DE COMPETENCIA

Curin, F.^{1,2}; Bracco, A.¹; Rossini, M.A.^{1,2}

¹ Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Monteagudo 2772, Pergamino Buenos Aires, Argentina.

² Centro de Investigaciones y Transferencia del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (CITNOBA). Monteagudo 2772, Pergamino Buenos Aires, Argentina.

Correo electrónico: fcurin@comunidad.unnoba.edu.ar, abracco@comunidad.unnoba.edu.ar, mdarossini@comunidad.unnoba.edu.ar

Silk emergence dynamics and its relationship with reproductive failure in maize (*Zeamays L.*) hybrids under different competition environments

Abstract

Grain number is the main determinant of maize yield, set during the critical period, when reproductive success depends on anthesis-silking synchrony and the temporal dynamics of silk emergence. Silks emerge from the base to the tip of the ear, exposing apical ovules to higher abortion risk because they are competitively disadvantaged relative to basal ovules. This study evaluated silk emergence dynamics and their relationship with reproductive abortion in three maize hybrids (DK69-62, DK72-20, DK74-47) under six competition environments from two sowing dates and three plant densities, in Junín (2025/26). Apical-ear yield and grain number were higher under early sowing (+26%, +12% grain weight) and low density; DK74-47 outyielded the other hybrids by 15% under early sowing, an advantage lost under late sowing due to lower grain weight. Silk emergence, fitted with an asymptotic function, revealed that DK74-47 had the highest maximum estimated number of emerged silks (17% higher at low density) and DK69-62 with the highest emergence rate, up 54% under late sowing. Grain abortion increased with density and late sowing, linked to fewer silks emerged by day five; DK69-62 showed higher abortion only under early sowing. Principal component analysis confirmed that abortion opposed yield-related variables, with sharper density-driven separation under late sowing, indicating contrasting hybrid reproductive strategies under competition.

Palabras claves: dinámica de emergencia de estigmas; intervalo anthesis silking; aborto de granos; densidad de planta; fecha de siembra

Keywords: silk emergence dynamics; anthesis-silking interval; grain abortion; plant density; sowing date



Introducción

El número de granos constituye el principal responsable de las variaciones del rendimiento en maíz, ya que es mucho más sensible que el peso individual de los granos frente a cambios ambientales y de manejo (Andrade et al., 2020). Su determinación ocurre durante el período crítico alrededor de floración, cuando el cultivo presenta la mayor sensibilidad frente a restricciones en la disponibilidad de recursos. En este período, el éxito reproductivo depende del sincronismo entre la antesis y la emergencia de estigmas (ASI), así como de la dinámica temporal con la que los estigmas emergen a lo largo de la espiga. La emisión de estigmas ocurre progresivamente desde la base hacia el ápice, por lo que los ovarios apicales son fecundados más tardíamente y presentan mayor probabilidad de aborto cuando existen limitaciones en el suministro de asimilados (Cárcova et al., 2000). En consecuencia, una emergencia más rápida y uniforme podría favorecer una fecundación más sincrónica y aumentar la supervivencia de los granos en desarrollo. La disponibilidad de recursos durante el período crítico es fuertemente influenciada por el ambiente y las prácticas de manejo. Elevadas densidades de plantas incrementan la competencia intraespecífica por radiación, agua y nutrientes, retrasando la emergencia de estigmas respecto de la antesis y aumentando el aborto reproductivo (Rossini et al., 2012). Asimismo, la fecha de siembra modifica las condiciones térmicas y radiativas durante la floración, afectando los procesos reproductivos (Cirilo y Andrade, 1994). Si bien numerosos trabajos analizaron el efecto del ambiente sobre la determinación del número de granos, existe menor información acerca de cómo diferentes ambientes de competencia modifican la dinámica temporal de emergencia de estigmas y su relación con el aborto reproductivo en híbridos modernos de maíz. El objetivo de este trabajo fue evaluar la dinámica de emergencia de estigmas y su relación con el aborto reproductivo en híbridos modernos de maíz sometidos a diferentes ambientes de competencia generados por combinaciones de fecha de siembra y densidad de plantas.

Materiales y métodos

El ensayo se realizó durante la campaña 2025/26 en el Campo Experimental “Las Magnolias” de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA), ubicado en Junín, provincia de Buenos Aires. Se evaluaron tres híbridos de maíz contrastantes: **DK69-62**, de ciclo corto y elevado potencial de rendimiento; **DK72-20**, de ciclo intermedio-corto y comportamiento estable frente a distintas condiciones ambientales; y **DK74-47**, de ciclo largo y alto potencial productivo cuando las condiciones ambientales son favorables.

Los híbridos se evaluaron en dos ambientes: una fecha de siembra temprana, realizada el 24 de septiembre, y otra tardía, realizada el 12 de diciembre. En cada fecha se utilizaron tres densidades de plantas: **BAJA**, correspondiente a 4,5 plantas m^{-2} en la siembra temprana y 6 plantas m^{-2} en la tardía; **MEDIA**, de 9 plantas m^{-2} ; y **ALTA**, de 12 plantas m^{-2} . De este modo, se obtuvieron seis combinaciones de fecha de siembra y densidad. En cada parcela se marcaron doce plantas consecutivas durante los estadios iniciales del cultivo, las cuales se dividieron en dos grupos. Las primeras seis plantas se utilizaron para determinar, a madurez fisiológica, el rendimiento en grano (RGE1), el número de granos (NGE1) y el peso individual de los granos (PG) de las espigas apicales.



Las seis plantas restantes se utilizaron para evaluar la dinámica de emergencia de los estigmas. Para ello, se registró la fecha de emisión de estigmas (R1), considerando como día 0 el día previo a R1, cuando no se observaban estigmas emergidos. Entre los dos y tres días posteriores a R1 se cortaron al ras de las chalas los estigmas emergidos. Posteriormente, entre los cinco y siete días después de R1, se cosecharon las espigas y se trazó una línea continua con tinta indeleble a la altura de la punta de las chalas para distinguir, durante la disección, los estigmas emergidos de aquellos que permanecían dentro de las chalas. Así, las flores se clasificaron según sus estigmas hubieran emergido entre los 2–3 días (puntas necrosadas por el corte), entre los 4–7 días (por encima de la línea de tinta y con puntas bífidas) o permanecieran dentro de las chalas con estigmas de al menos 1 mm de longitud. En cada oportunidad de evaluación, el número de flores con estigmas en diferentes estadios se estimó mediante el conteo de flores con estigmas visibles en dos hileras opuestas de la espiga y posterior multiplicación del promedio por el número total de hileras (Rossini et al., 2021). A partir de estos registros se caracterizó la dinámica de emergencia de estigmas mediante el ajuste de una función asintótica:

$$Y = a(1 - e^{-bx})$$

donde Y representa el número acumulado de estigmas emergidos, a corresponde al número máximo estimado de estigmas emergidos o plateau, b es el parámetro asociado con la velocidad de emergencia y x representa el tiempo transcurrido desde R1. A partir de dicho modelo se estimó el número de estigmas emergidos a los 5 días (NE5D) luego de R1 para la cuantificación de la pérdida de estigmas y del aborto de granos. La falla de emergencia de estigmas (Pérdida 1) se calculó como la proporción de flores completas (*i.e.*, con estigma mayor a 1 mm) cuyos estigmas no habían emergido a los 5 días luego de R1, y el aborto de granos como la proporción de NE5D que no generaron grano.

Las variables se analizaron mediante análisis de la varianza con InfoStat. Las siembras temprana y tardía se analizaron en forma conjunta considerando la fecha de siembra como un factor fijo y el bloque anidado dentro de la fecha. En cada fecha se utilizó un diseño en bloques completos al azar con parcelas divididas y tres repeticiones, asignando las densidades a las parcelas principales y los híbridos a las subparcelas.

Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales por separado para cada fecha de siembra, con el objetivo de describir la respuesta conjunta de las variables y la ubicación relativa de las combinaciones densidad × híbrido dentro de cada ambiente. Para cada variable se ajustó previamente un modelo que incluyó únicamente el efecto de bloque, y los residuos resultantes se estandarizaron antes de efectuar el PCA a partir de la matriz de correlaciones. En este análisis solo se removió la variación asociada con el bloque, a fin de conservar las diferencias debidas a la densidad, el híbrido y su interacción. Cada punto del biplot representó el centroide de las tres repeticiones de una combinación densidad × híbrido, mientras que las flechas correspondieron a las cargas de las variables sobre los dos primeros componentes.

Resultados

Rendimiento y componentes numéricos de la espiga apical

El rendimiento en granos (RGE1) como el número de granos (NGE1) de la espiga apical presentaron diferencias significativas entre los diferentes ambientes de evaluación (*i.e.*, fechas de siembra), densidades e híbridos mientras que el peso individual de los granos

(PIG) solamente presentó diferencias significativas entre los ambientes de evaluación y las densidades (Tabla 1). Entre ambientes, la fecha temprana fue la que mayores valores registró con aumento de entre el 12 % para PIG y 26 % para el RGE1, mientras que entre densidades los mayores valores se registraron siempre en las densidades más bajas (Tabla 1). Entre híbridos, el DK6962 y el DK7447 fueron los que menores y mayores valores de RGE1 y NGE1 registraron, mientras que el PIG no difirió significativamente entre ellos (Tabla 1). Al comparar el efecto de la fecha de siembra sobre los híbridos evaluados, se observó que en la siembra temprana DK7447 presentó un RGE1 un 15 % superior al promedio de los otros dos híbridos, asociado a incrementos del 10 % en el número de granos por espiga (NGE1) y del 4 % en el peso individual de los granos (PIG). En cambio, en la siembra tardía estas diferencias en RGE1 desaparecieron, ya que, si bien DK7447 mantuvo un NGE1 aproximadamente un 8 % superior al promedio de los otros híbridos, este incremento fue compensado por una reducción cercana al 8 % en el PIG.

Tabla 1. Valores de medios y resultado del ANOVA del rendimiento en grano (RGE1), peso individual de granos (PIG) y número de granos de la espiga apical (NGE1)

TRATAMIENTO		CARACTERES					
		RGE1 (g m-2)		PG (mg)		NGE1 (unidades)	
AMBIENTE	TEMPRANO	174		304		569	
	TARDIO	138		270		507	
DENSIDAD	BAJA	194		321		602	
	MEDIA	154		286		537	
	ALTA	121		255		475	
HÍBRIDO	DK 6962	150		283		526	
	DK 7474	164		284		570	
	DK 7220	155		295		518	
AMBIENTE × DENSIDAD	BAJA	TEMPRANO	TARDIO	TEMPRANO	TARDIO	TEMPRANO	TARDIO
	MEDIA	214	174	340	302	629	575
	ALTA	169	138	298	273	567	506
AMBIENTE × HÍBRIDO	DK 6962	140	103	273	236	511	440
	DK 7474	161	139	297	269	541	511
	DK 7220	191	138	312	255	607	533
HÍBRIDO × DENSIDAD	BAJA	171	138	303	287	558	478
	MEDIA	6962	7474	7220	6962	7474	7220
	ALTA	184	208	190	312	331	320
SIGNIFICANCIA	AMBIENTE	145	160	156	276	284	296
	DENSIDAD	122	124	117	260	235	269
	HÍBRIDO	467	523	435	467	523	435
SIGNIFICANCIA	AMBIENTE × DENSIDAD	*** (21)	*** (27)	*	*** (21)	*** (27)	*** (40)
	AMBIENTE × HÍBRIDO	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	HÍBRIDO × DENSIDAD	*	**	*	*	(28)	ns

Dinámica de emergencia de estigmas y establecimiento reproductivo

Los parámetros de la dinámica de emergencia de estigmas variaron significativamente ($p < 0,01$) entre híbridos, tanto para el número máximo estimado de estigmas emergidos (a) como para la tasa de emergencia de estigmas (b), mientras que la fecha de siembra solo afectó la tasa de emergencia (Tabla 2). Entre los híbridos, DK7447 presentó el mayor número máximo estimado de estigmas emergidos, mientras

que DK6962 registró la mayor tasa de emergencia. Asimismo, el número máximo estimado de estigmas mostró una interacción significativa entre híbrido y densidad, mientras que la tasa de emergencia presentó una interacción significativa entre híbrido y fecha de siembra ($p < 0,01$). En particular, DK7447 fue el único híbrido que incrementó un 17 % el número máximo estimado de estigmas al disminuir la densidad de plantas, mientras que DK6962 fue el único que aumentó un 54 % la tasa de emergencia de estigmas al retrasar la fecha de siembra.

En concordancia con estos resultados, el número de estigmas emergidos al quinto día (NE5D), las fallas en la emergencia de estigmas al quinto día (PÉRDIDA1) y el aborto de granos en etapas tempranas (ABORTO) presentaron diferencias significativas entre fechas de siembra, mientras que entre híbridos solo NE5D y ABORTO difirieron significativamente y entre densidades únicamente lo hizo ABORTO (Tabla 3). La fecha de siembra temprana registró los menores valores de NE5D y de ABORTO pero mayores valores de fallas en la emergencia de estigma (PÉRDIDA1), mientras que el incremento en la densidad aumentó el porcentaje de aborto de granos. Finalmente, la interacción entre fecha de siembra e híbrido mostró que DK6962 presentó un mayor porcentaje de ABORTO en la siembra temprana respecto de los demás híbridos, diferencia que desapareció, al menos con 7447, durante la siembra tardía.

Tabla 2. Valores medios y resultados del ANOVA del número máximos estimado de estigmas emergidos (a) y tasa de emergencia de estigmas emergidos, número de flores totales (NFT), el número de flores cuyos estigmas emergieron al día 5 (NE5D), las estimaciones de fallas en la emergencia de estigmas al día 5 (PERDIDA 1) y aborto de granos estimado (ABORTO).

TRATAMIENTO		CARACTERES											
		a		b		NFT		NE5D		ABORTO		PERDIDA_1	
AMBIENTE	TEMPRANO	657		0,54		671		538		-7%		20%	
	TARDIO	678		0,42		651		618		18%		5%	
DENSIDAD	BAJA	693		0,46		659		588		-4%		11%	
	MEDIA	650		0,51		665		574		5%		14%	
	ALTA	660		0,47		659		571		15%		13%	
HÍBRIDO	DK 6962	683		0,59		694		617		14%		11%	
	DK 7474	722		0,40		691		597		3%		14%	
	DK 7220	598		0,45		598		519		-1%		12%	
AMBIENTE x DENSIDAD	BAJA	TEMPRANO	TARDIO	TEMPRANO	TARDIO	TEMPRANO	TARDIO	TEMPRANO	TARDIO	TEMPRANO	TARDIO	TEMPRANO	TARDIO
	MEDIA	691	695	0,42	0,50	660	659	535	640	-18%	10%	19%	3%
	ALTA	663	637	0,44	0,57	675	654	545	603	-5%	15%	19%	8%
AMBIENTE x HÍBRIDO	DK 6962	680	640	0,39	0,55	678	639	533	610	3%	28%	21%	4%
	DK 7474	700	665	0,46	0,71	704	683	585	649	7%	21%	17%	5%
	DK 7220	724	720	0,36	0,44	680	701	537	656	-13%	19%	21%	6%
HÍBRIDO x DENSIDAD	BAJA	610	586	0,43	0,47	628	568	491	548	-14%	13%	21%	3%
	MEDIA	6962	7474	7220	6962	7474	7220	6962	7474	7220	6962	7474	7220
	ALTA	678	798	602	0,62	0,31	0,46	698	692	589	625	606	532
SIGNIFICANCIA	AMBIENTE	ns		*** (0,09)		ns		*** (19)		*** (5 %)		*** (3 %)	
	DENSIDAD	ns		ns		ns		ns		*** (7 %)		ns	
	HÍBRIDO	*** (33)		*** (0,08)		*** (26)		*** (21)		*** (5 %)		ns	
SIGNIFICANCIA	AMBIENTE x DENSIDAD	ns		ns		ns		ns		ns		ns	
	AMBIENTE x HÍBRIDO	ns		* (0,11)		* (37)		* (30)		** (7 %)		ns	
	HÍBRIDO x DENSIDAD	* (57)		ns		ns		ns		ns		ns	

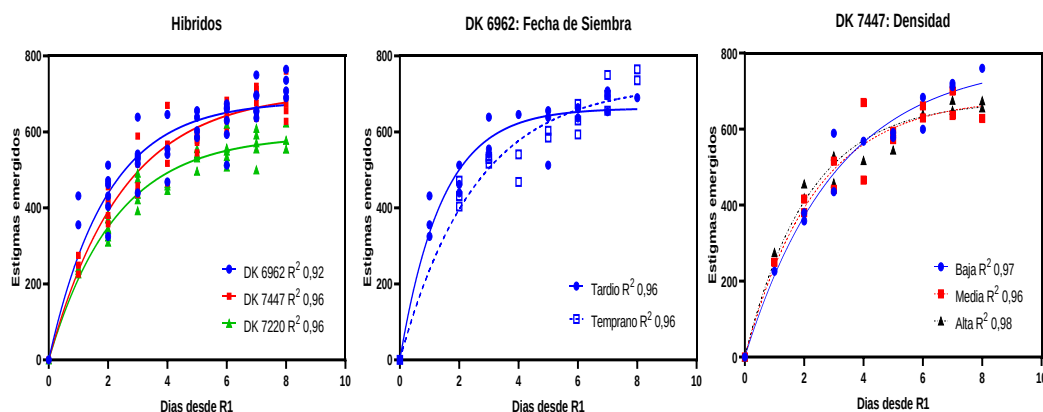


Figura 1. Dinámica de emergencia de estigmas en función de los días transcurridos desde R1. El panel izquierdo muestra la respuesta de los híbridos DK69-62, DK72-20 y DK74-47; el panel central, el efecto de la fecha de siembra (temprana y tardía) para DK69-62; y el panel derecho, el efecto de la densidad de plantas (baja, media y alta) para DK74-47. Los símbolos representan los valores observados y las líneas corresponden al ajuste de la función asintótica.

Análisis de componentes principales

En la siembra temprana, los dos primeros componentes explicaron el 80,5 % de la variación (Figura 2). El CP1 (46,4 %) contrapuso el aborto y las fallas de emisión de estigma (Perdida 1) con las variables vinculadas a la expresión productiva por planta (PG, RGE1, NGE1), mientras que el CP2 (34,1 %) estuvo determinado principalmente por *a*, NE5D y NFT, en oposición a *b*. En la siembra tardía, los dos primeros componentes explicaron el 74,6 % de la variación y se mantuvo la contraposición entre aborto y componentes productivos, aunque con una reorganización notable: NGE1 y RGE1 se ubicaron sobre el CP1 mientras que PG se desplazó hacia el CP2, indicando que en tardía el peso individual del grano varió de manera parcialmente independiente del número de granos por espiga. Además, *a*, NE5D y NFT se agruparon más estrechamente entre sí y *b* quedó próximo al origen, perdiendo capacidad para diferenciar tratamientos.

La distribución de los tratamientos también cambió entre fechas. En la siembra temprana, DK74-47 en baja densidad se asoció con la mayor expresión productiva por planta (extremo positivo del CP1), mientras que DK69-62 en densidades media y alta y DK74-47 en alta densidad se ubicaron hacia el sector del aborto. DK72-20 se diferenció principalmente sobre el CP2: en baja densidad quedó asociado a valores altos de PG pero con menor emergencia de estigmas, y en densidades media y alta se vinculó con *b*. En la siembra tardía, la separación por densidad se hizo mucho más marcada: los tratamientos de baja densidad se agruparon del lado positivo del CP1, asociados a PG, RGE1 y NGE1, mientras que los de alta densidad se desplazaron hacia el sector del aborto. DK69-62 y DK74-47 en baja densidad se vincularon con una mayor expresión productiva y con las variables que describen la magnitud y el momento de la emergencia de estigmas (NE5D, NFT, *a*), mientras que DK72-20 en baja densidad se asoció principalmente con el peso individual del grano (PG). En ambas fechas, DK72-20 mostró un comportamiento diferenciado del resto de los híbridos, particularmente en las



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

densidades media y alta, ubicándose consistentemente por debajo del eje de la dinámica de estigmas.

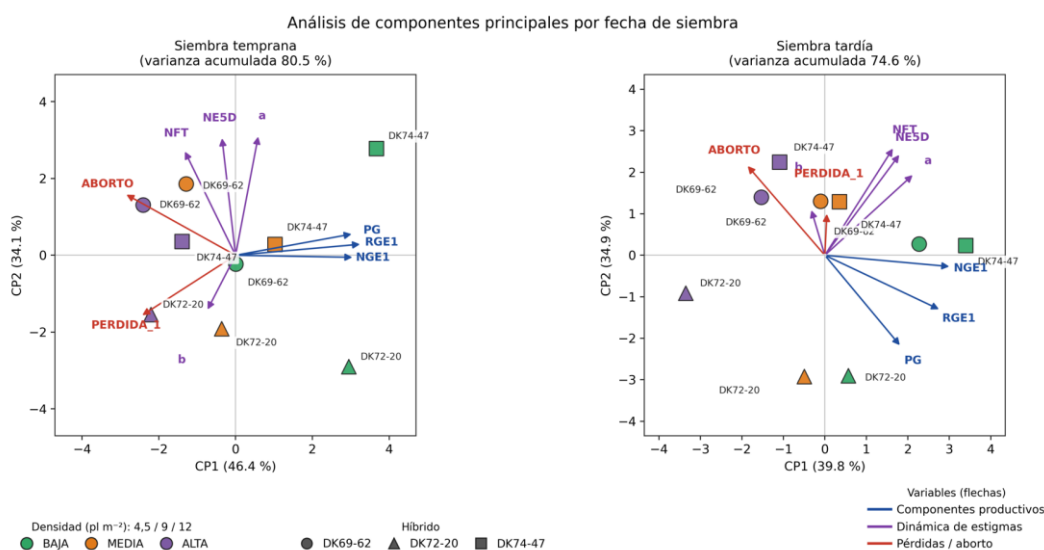


Figura 2. Análisis de componentes principales realizado por separado para las siembras temprana y tardía, a partir de variables estandarizadas. Cada punto representa el promedio de las tres repeticiones de una combinación densidad $\times$ híbrido. Los colores identifican las densidades de plantas (verde = $4,5 \text{ pl m}^{-2}$; naranja = 9 pl m^{-2} ; violeta = 12 pl m^{-2}), los símbolos los híbridos (círculo = DK69-62; triángulo = DK72-20; cuadrado = DK74-47), y las flechas representan las cargas de las variables (azul = componentes productivos; violeta = dinámica de estigmas; rojo = pérdidas y aborto).

Discusión y Conclusiones

La emergencia de estigmas formó parte de una respuesta reproductiva integrada a la disponibilidad de recursos durante el período crítico (Cárcova et al., 2000; Cárcova y Otegui, 2007). En los ambientes de mayor competencia, el aumento del aborto indica que una proporción mayor de las estructuras reproductivas generadas no logró sostenerse hasta la formación de granos (Andrade et al., 1996; Tollenaar et al., 1992; Rossini et al., 2012). Esto sugiere que la limitación no se produjo únicamente durante la emergencia de los estigmas, sino también en etapas posteriores, vinculadas con la fecundación y el crecimiento inicial de los granos (Cárcova et al., 2003; Otegui y Andrade, 2000).

Las diferencias entre híbridos muestran, además, que la magnitud y la velocidad de emergencia representan estrategias reproductivas distintas. Un mayor número potencial de estigmas, como el observado en DK74-47, puede favorecer la formación de granos cuando la oferta de recursos es adecuada, pero también generar una mayor demanda reproductiva que no necesariamente puede sostenerse en ambientes restrictivos (Andrade et al., 2020). Del mismo modo, una emergencia más rápida, como en DK69-62, podría mejorar el sincronismo reproductivo y reducir la exposición de los estigmas más tardíos (Cárcova et al., 2000), aunque no garantiza por sí sola un menor aborto.



La mayor separación entre densidades en la siembra tardía indica que el efecto de la competencia se intensificó en ese ambiente (Cirilo y Andrade, 1994; Tollenaar et al., 1992). En estas condiciones, la densidad afectó no solo el tamaño potencial de la espiga, sino también la capacidad de convertir las estructuras reproductivas en granos viables (Andrade et al., 1996; Rossini et al., 2012).

En conjunto, la dinámica de emergencia de estigmas contribuyó a explicar el establecimiento reproductivo, pero su efecto dependió del ambiente y del híbrido. Ni una mayor magnitud ni velocidad de emergencia fueron suficientes por sí solas para evitar el aborto, por lo que el ajuste de la densidad y la fecha de siembra debería considerar la estrategia reproductiva de cada genotipo.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al personal técnico del Campo Experimental “Las Magnolias” de la Universidad del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires como así también al subsidio otorgado por la misma universidad SIB 5604/2024.

Bibliografía

Andrade, F.H., A.G. Cirilo, S.A. Uhart y M.E. Otegui. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. 1a ed. INTA FCA-UNMdP, Editorial La Barrosa, Dekalb Press, Balcarce, Argentina. 292 p.

Andrade, F.H., C. Vega, A. Cirilo y M.E. Otegui. 2020. Determinación del número de granos. En F.H. Andrade (Ed.), Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz (Cap. 4, pp. 101–126). INTA.

Cárcova, J., M. Uribe Larrea, L. Borrás, M.E. Otegui y M.E. Westgate. 2000. Synchronous pollination within and between ears improves kernel set in maize. *Crop Science* 40: 1056–1061.

Cárcova, J., B. Andrieu y M.E. Otegui. 2003. Silk elongation in maize: relationship with flower development and pollination. *Crop Science* 43: 914–920.

Cárcova, J. y M.E. Otegui. 2007. Ovary growth and maize kernel set. *Crop Science* 47: 1104–1110.

Cirilo, A.G. y F.H. Andrade. 1994. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science* 34: 1044–1046.

Otegui, M.E. y F.H. Andrade. 2000. New relationships between light interception, ear growth, and kernel set in maize. En M.E. Westgate y K.J. Boote (Eds.), *Physiology and Modeling Kernel Set in Maize*. CSSA and ASA, Madison, WI. pp. 89–102.

Rossini, M.A., G.A. Maddonni y M.E. Otegui. 2012. Inter-plant variability in maize crops grown under contrasting N×stand density combinations: links between development, growth and kernel set. *Field Crops Research* 133: 90–100.

Rossini, M. A., Hisse, 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 Science*, 60(2), 961–976. <https://doi.org/10.1002/csc2.20123>

Tollenaar, M., L.M. Dwyer y D.W. Stewart. 1992. Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Science* 32: 432–438.