

Bases fisicoquímicas de la calidad industrial del maíz pisingallo

Bertochi Graziano.A.N. ^{*1}; Alvarez Prado.S ^{1, 2}; Gerde.J ^{1, 2}.

¹ Cátedra de Sistemas de Cultivos Extensivos: Cereales y Oleaginosos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Zavalla, Santa Fe, Argentina.

² Grupo de Investigación en Manejo y Utilización de Cultivos Extensivos (GIMUCE) - IICAR – CONICET-UNR, Zavalla, Santa Fe, Argentina.

*ailen.bertochi@gmail.com

Physicochemical basis of the industrial quality of popcorn maize

Abstract: Popcorn is intended for human consumption after cooking. Popcorn expansion and K10 index, the primary industrial quality attributes, are linked to endosperm hardness and zein composition. The objective of this work was to understand the relationship between grain physicochemical attributes and industrial quality using six popcorn genotypes grown in six contrasting environments with varying nitrogen rates. Expansion and K10 varied significantly among genotypes, environments, and their interaction, while no differences were detected among nitrogen treatments. Kernel density was positively related to expansion. This relationship was dependent on the genotype, whereas density and K10 were negatively related across all genotypes. Protein content was positively associated with density. Regarding zein fractions concentrations, the C1 zein was negatively associated with expansion and positively with starch and oil content, while proportion C2 showed the opposite pattern; total protein content depended on interactions between zein fractions. These results provide evidence regarding the physicochemical basis of popcorn industrial quality and suggest that zein composition could serve as a useful criterion for improving expansion.

Palabras Clave - Keywords:

Maíz pisingallo - calidad industrial – expansión - proteína - zeínas

Popcorn – industrial quality – expansion – protein - zein

Introducción

Actualmente, la producción del maíz pisingallo se destina a consumo humano como un alimento tipo snack luego de su cocción. Los atributos de calidad para la industria más importantes son el volumen de expansión y el K10. El volumen de expansión es el cociente entre el volumen ocupado por las rosetas y el peso de los granos a partir de los cuales se originaron ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$). El valor mínimo de exportación es de $38\text{-}40 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Mientras que el K10 es el número de granos en 10 g, una medida del tamaño de los granos por lo que a menor K10, mayor tamaño de grano, lo cual es preferido por la industria.

La dureza del grano se define como la cantidad de endosperma vítreo con relación a la cantidad de endosperma harinoso presentes en un grano de maíz. La proporción de endosperma vítreo (responsable de la dureza) en maíz ha sido relacionada con la concentración y composición de ciertas proteínas: las zeínas (Gerde et al., 2016). Además del efecto del genotipo, otras variables de manejo como la fertilización con nitrógeno y la fecha de siembra tienen impacto sobre su composición. Los cambios en la oferta de recursos, a través de prácticas de manejo como la elección del genotipo, la

correcta fertilización con nitrógeno y la elección de la fecha de siembra poseen un rol crítico en el rendimiento final del cultivo de maíz y en su calidad de grano (Tamagno et al., 2016).

Debido a que el incremento en algunas de las proteínas de reserva ha sido propuesto también como contribuyente de la expansión del grano (Borrás et al., 2006), combinaciones de variables de manejo que aumenten la concentración de zeínas y, por ende, incrementen la dureza del endosperma mejorarán la calidad del grano de maíz pisingallo. A pesar de la evidencia del efecto que tiene la fertilización con nitrógeno en el rendimiento del maíz y de que ciertas prácticas de manejo del cultivo de maíz pisingallo influyen sobre el volumen de expansión del grano (Balbi et al., 2014), aún no se comprenden totalmente las bases fisicoquímicas por las que dichas prácticas impactan sobre la expansión.

El objetivo del trabajo fue evaluar la relación entre los atributos fisicoquímicos del grano (composición, densidad, fracciones proteicas) y la calidad industrial (expansión y K10) en genotipos de maíz pisingallo cultivados en condiciones de fertilización nitrogenada y ambientes contrastantes.

Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo durante la campaña 2023-2024, donde se evaluaron seis híbridos de maíz pisingallo no modificados genéticamente seleccionados por presentar diferencias en rendimiento y en calidad industrial. Los híbridos se sembraron en seis ambientes distintos, generados a partir de la combinación de dos sitios, dos fechas de siembra y, específicamente en Zavalla, dos regímenes hídricos aplicados en ambas fechas. En los ambientes bajo riego, este fue de tipo aspersión y se utilizó como suplemento para asegurar que el cultivo no atravesara limitaciones hídricas durante su desarrollo.

Dentro de cada uno de estos ambientes se implementaron cuatro niveles de nitrógeno, resultantes de sumar el nitrógeno disponible en el suelo al momento de la siembra (nitratos a 0-60 cm de profundidad) más el aportado mediante fertilización, con distintas dosis y momentos de aplicación (Tabla 1). Como fuente nitrogenada se empleó urea (46-0-0). Cabe destacar que los valores de nitrógeno en el suelo a la siembra fueron elevados en esta campaña debido a que el año anterior fue muy seco.

Tabla1. Tratamientos de nitrógeno (Ns + %fert). Donde Ns = nitrógeno en el suelo a la siembra (0-60 cm) y % fert. = nitrógeno aplicado con fertilizante respecto del nitrógeno inicial (Ns). Los momentos de aplicación fueron S = siembra, V5 = cinco hojas expandidas, R1 = floración femenina. Los rangos de N explorados señalan los kg.ha^{-1} (Ns+ % fert) de nitrógeno en los seis ambientes.

Tratamiento		Siembra	V5	R1	Rango de N
			%		kg.ha^{-1} N (T0 + fert.)
T0	Ns	0	0	0	144-280
T1	Ns + 60% fert.	60	40	0	230-444
T2	Ns + 60% fert.	60	20	20	230-444
T3	Ns + 90% fert.	60	40	0	275-532

El diseño experimental fue completamente aleatorizado con cuatro repeticiones en cada ambiente. Se sembraron como unidades experimentales parcelas de 12,5 m² (4 surcos con distanciamiento entre hileras de 0,52 m), con una densidad de siembra de 8,8 pl.m⁻². Para las mediciones de variables se cosecharon de forma manual los dos surcos centrales de cada parcela.

Se midió la concentración de proteína, almidón y aceite en base seca (%) mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRs) y su contenido (mg.grano⁻¹). También, se midió la densidad de grano (g.cm⁻³), el volumen de expansión (cm³.g⁻¹) con un Cretors Metric Weight Volume Tester (MWVT) y el K10 (a partir del peso de mil granos). En cuanto a los perfiles de zeínas reducidas se determinaron mediante cromatografía líquida de alta resolución en fase reversa (RP-HPLC; Gerde et al., 2016) en solo dos tratamientos contrastantes de nitrógeno el T0 y T3.

Para el análisis de los resultados se realizó un ANOVA (InfoStat versión 2020). El modelo incluyó los factores genotipo (G), tratamientos con N (T), ambientes (A), y sus interacciones. Se utilizó la prueba LSD para las comparaciones de medias con un valor de significancia de $\alpha = 0,05$. Las relaciones entre variables se analizaron mediante correlación de Pearson y análisis de regresión lineal entre variables en RStudio, utilizando funciones de los paquetes stats, ggplot2 y dplyr.

Para comprender los cambios del contenido de proteína, se evaluó la estructura de la interacción GxA. Para esto, primero se ajustó un modelo mixto con efecto fijo para el tratamiento con nitrógeno (T) y efectos aleatorios para el genotipo (G), el ambiente (A), la interacción genotipo-ambiente (GxA), y la varianza del error residual específica del experimento (Err). Como en el trabajo de Millet et al. (2016), los componentes de varianza de los términos aleatorios se obtuvieron siguiendo el mismo procedimiento, y las desviaciones estándares se expresaron como un porcentaje de la media general.

$$Y = T + G + A + GxA + Err \quad (1)$$

El siguiente paso fue comprender como las fracciones de zeínas (Z) repercuten en los valores de contenido de proteína. El conjunto de zeínas utilizado en el modelo se determinó mediante un proceso de eliminación hacia atrás aplicado al conjunto completo de zeínas (Z1 y sub-fracciones de las Z2: C1, C2, E y F) y sus interacciones. Para evaluar la magnitud de la covarianza explicada por las zeínas, comparamos los componentes de varianza estimados en la Ecuación 1 con los obtenidos en la Ecuación 2.

$$Y = Z + \text{Interacción de } Z + T + G + A + GxA + Err \quad (2)$$

Resultados y discusión

La expansión de grano mostró diferencias entre genotipos (G), ambientes (A) y la interacción GxA ($p < 0,001$), y variaron entre 28 y 49 cm³.g⁻¹. El umbral mínimo de 38 cm³.g⁻¹ fue superado en cinco de los seis ambientes y por cuatro de los seis genotipos evaluados. El índice K10 varió entre 48,8 y 96,1 granos.10 g⁻¹, y se alcanzaron valores adecuados ($< 65-70$ granos.10 g⁻¹) en cuatro de los seis ambientes. La calidad industrial presentó diferencias significativas en la interacción GxA, sin observar cambios por los tratamientos de nitrógeno (Tabla 2). Seguramente la falta de diferencias significativas

entre los tratamientos de nitrógeno se pueda deber a que los valores de nitrógeno en el suelo disponibles a la siembra fueron elevados ($144-280 \text{ kg N.ha}^{-1}$) y saturaron la respuesta a dosis más elevadas. Esto concuerda con Balbi et al (2014) que observaron que el aporte de mayores recursos por planta, si bien no trabajaron con dosis de N, resultaron en valores de estos atributos de calidad comparables con los de este trabajo.

Tabla 2. Expansión, K10, densidad, concentración de proteína, almidón y aceite, y contenido de proteína, almidón y aceite en grano en los seis genotipos (A-F), en los cuatro tratamientos con nitrógeno y en los seis ambientes, donde Zav= Zavalla, Hg= Hughes, Tem= temprano, Tard= tardío, R= riego y S= seco. Al final se presentan las fuentes de variación.

	Expansión	K10	Densidad	Proteína	Almidón	Aceite	Proteína	Almidón	Aceite
	cm ³ .g ⁻¹	granos.(10g) ⁻¹	g.cm ⁻³	%			mg.grano ⁻¹		
Genotipo (G)									
A	43,4	61	1,227	10,8	68,8	4,7	15,5	98,4	6,7
B	37,6	63	1,241	10,9	69,7	4,9	15,3	97,8	6,9
C	40,4	68	1,251	11,0	69,8	4,9	14,2	90,0	6,3
D	39,8	64	1,220	11,1	69,6	5,0	15,2	94,8	6,8
E	40,2	63	1,213	10,3	69,1	4,8	14,3	96,2	6,6
F	37,5	62	1,227	10,8	69,8	4,9	15,2	98,2	6,9
Tratamiento (T)									
T0	39,6	63	1,230	10,7	69,4	4,8	14,8	96,2	6,7
T1	39,7	63	1,232	10,8	69,5	4,9	14,9	96,2	6,7
T2	39,8	64	1,230	10,9	69,5	4,9	15,0	95,7	6,7
T3	40,2	64	1,228	10,9	69,4	4,9	15,0	95,5	6,7
Ambiente (A)									
Zav-Tem-R	40,5	55	1,235	10,7	69,1	4,7	17,0	109,3	7,5
Zav-Tem-S	39,6	61	1,231	10,6	69,1	4,7	15,2	98,9	6,8
Hg-Tem-S	42,4	59	1,238	10,9	68,8	4,9	16,1	101,9	7,3
Zav-Tar-R	40,1	65	1,233	10,7	69,9	4,9	14,4	94,0	6,5
Zav-Tar-S	39,3	68	1,231	10,7	69,9	4,9	13,6	89,0	6,3
Hg-Tar-S	36,8	74	1,212	11,3	70,0	5,0	13,2	81,9	5,9
Fuentes de variación									
G	***(0,7)	***(1,3)	***(0,005)	***(0,83)	***(0,16)	***(0,04)	***(0,27)	***(1,6)	***(0,12)
T	ns	ns	ns	***(0,06)	ns	ns	ns	ns	ns
A	***(0,7)	***(1,3)	***(0,005)	***(0,83)	***(0,16)	***(0,04)	***(0,27)	***(1,6)	***(0,12)
AxG	***(1,7)	***(3,1)	***(0,013)	***(0,20)	***(0,40)	***(0,10)	***(0,66)	***(3,9)	***(0,31)
AxT	ns	ns	ns	***(0,16)	ns	ns	ns	ns	ns

*** significa $p < 0,001$; ns = no significativo.

Números en paréntesis representan las mínimas diferencias significativas (LSD).

La densidad del grano, medida como indicador de dureza, fluctuó entre $1,118$ y $1,270 \text{ g.cm}^{-3}$, presentando diferencias significativas ($p < 0,001$) por genotipos, ambientes e interacción GxA. Los componentes de grano proteína, almidón y aceite presentaron diferencias entre genotipos, ambientes y en la interacción GxA ($p < 0,001$). La concentración de proteína, almidón y aceite variaron entre $8,9$ y $12,1 \%$, $67,4$ y $72,0 \%$, y entre $4,2$ y $5,4 \%$, respectivamente. En el caso de la concentración de proteína también se observaron diferencias significativas entre tratamientos con nitrógeno y la interacción AxT (Tabla 2).

Si bien se observó una baja correlación general positiva entre densidad y expansión ($r=0,19$; $p<0,05$), la misma varió según el genotipo (Fig. 1). En cuanto a la correlación general entre densidad y K10, esta también fue baja pero significativa ($r=-0,26$; $p<0,05$), sin observarse un comportamiento diferencial de los genotipos ($p>0,05$) (Fig. 1).

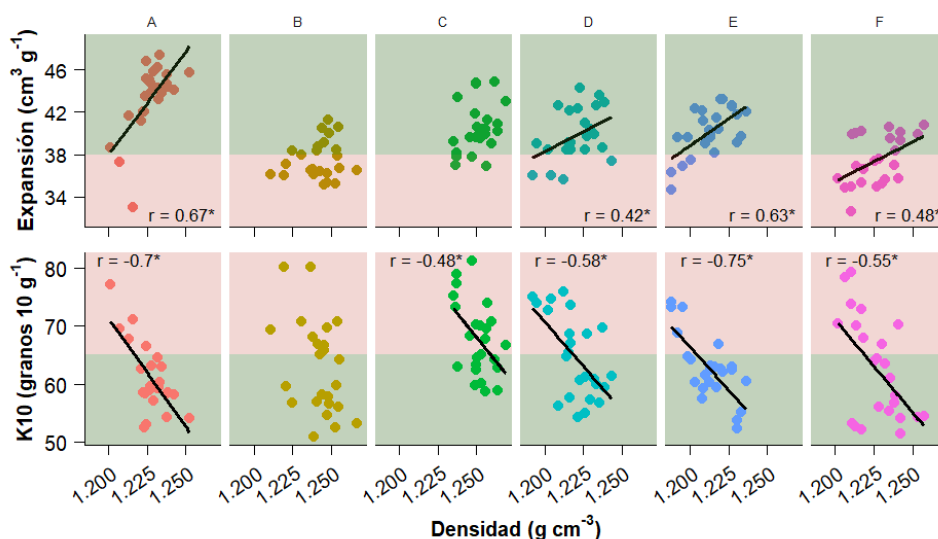


Figura 1. Relación de la densidad del grano y la calidad industrial, expansión y K10 en los seis genotipos. Las áreas verdes señalan valores deseados por la industria, en expansión mayores a 38 y en K10 menores a 65.

El contenido de proteína se asoció positivamente con la densidad del grano de forma consistente en todos los genotipos y ambientes evaluados. Es decir, a mayor contenido de proteína, mayor densidad, donde genotipo y ambiente aportaron variabilidad a la densidad (Fig. 2).

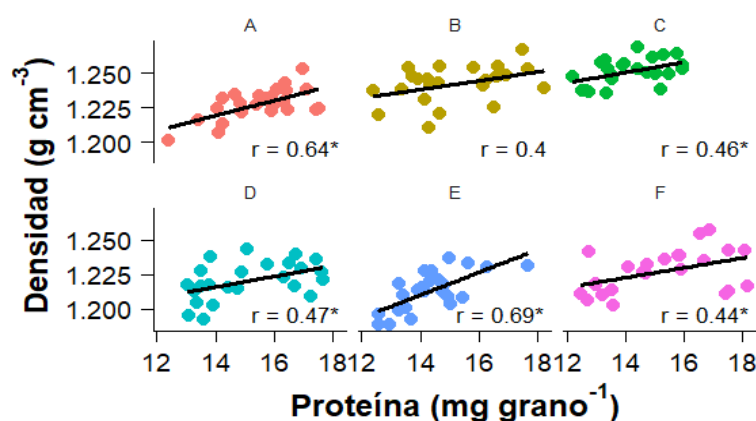


Figura 2. Relación del contenido de proteína y la densidad del grano en los seis genotipos.

Las distintas zeínas fueron agrupadas en Z1 (α y δ) y Z2 (15kDa β -zeínas C1 y C2, 27kDa γ -zeínas E, y 16kDa γ -zeínas F) y se obtuvieron de cada una de ellas la concentración (% p/p), contenido en grano (mg.grano^{-1}) y la proporción (%).

Tabla 3. Matriz de correlación entre variables de calidad industrial (expansión y K10), atributos fisicoquímicos (densidad de grano, concentración de proteína, almidón y aceite, contenido de proteína) y la concentración, proporción y contenido de zeínas (Z1, Z2 y subfracciones de Z2: C1, C2, E y F) correspondientes sólo a los tratamientos de nitrógeno T0 y T3, de los genotipos y ambientes evaluados.

		Expansión	K10	Densidad	Proteína	Almidón	Aceite	Proteína
		cm ³ .g ⁻¹		g.cm ⁻³	Concentración (g.100g ⁻¹)			mg.grano ⁻¹
Concentración (g.100g ⁻¹)	C1	-0,51***	ns	-0,24*	0,29*	0,36**	0,43***	ns
	C2	ns	ns	ns	ns	ns	-0,39***	ns
	E	-0,26*	0,32**	ns	ns	ns	ns	-0,27*
	F	ns	ns	-0,26*	ns	ns	-0,32**	ns
	Z1	-0,30*	0,25*	ns	ns	ns	ns	ns
	Z2	ns	0,24*	ns	0,27*	ns	ns	ns
Proporción (%)	C1	-0,46***	ns	ns	ns	0,33**	0,48***	ns
	C2	0,29*	ns	ns	-0,40***	-0,28*	-0,52***	ns
	E	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,26*
	F	ns	ns	ns	ns	ns	-0,47***	ns
	Z1	ns	ns	ns	-0,26*	ns	-0,34**	ns
	Z2	ns	ns	ns	0,26*	ns	0,34**	ns
Contenido (mg.grano ⁻¹)	C1	-0,39***	ns	ns	ns	ns	0,33**	ns
	C2	ns	ns	ns	-0,24*	-0,35**	-0,56***	ns
	E	ns	ns	ns	ns	ns	-0,31**	ns
	F	ns	-0,24*	ns	ns	-0,30**	-0,50***	ns
	Z1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,27*
	Z2	ns	ns	ns	ns	ns	-0,40***	ns

*** significa p<0,001; ** significa p<0,01; * significa p<0,05; ns = no significativo.

Dentro de las fracciones individuales de las Z2, la C1 fue la que mostró la asociación más consistente con la calidad industrial del maíz pisingallo: se relacionó negativamente con la expansión (concentración, proporción y contenido de C1, $r = -0,39$ y $-0,51$; $p < 0,01$) y positivamente con la concentración de almidón y aceite ($r = 0,33$ y $0,48$; $p < 0,01$; Tabla 3). Por otro lado, la proporción de la fracción C2 mostró un patrón inverso, asociándose positivamente con la expansión y negativamente con almidón y aceite (Tabla 3). Las fracciones F y Z2 se correlacionaron negativamente con el aceite en sus tres formas de expresión ($p < 0,05$), en tanto que Z1 se asoció positivamente con el porcentaje de proteína y de aceite. Estos resultados sugieren que el balance entre C1 y C2 (variantes alélicas de la misma proteína) podría contribuir a explicar diferencias en la

expansión, ya que estas se encuentran involucradas en las características físicas del grano de maíz (Caballero-Rothar et. al 2019).

Tabla 4. Componentes de varianza de los diferentes modelos mixtos para el contenido de proteína en grano (mg. grano^{-1}).

Modelo estadístico	Tipo	GxA	G	A	Err
Modelo 1: T+ Aleatorio	Componentes de variancia (mg. grano^{-1})	0,08	0,16	2,42	2,25
Modelo 2: Z + T + Aleatorio	Componentes de variancia (mg. grano^{-1})	0,16	0,00	1,82	1,77
Modelo 1: T+ Aleatorio	DS cómo % de las medias	0,30	0,41	1,56	1,50
Modelo 2: Z + T + Aleatorio	DS cómo % de las medias	0,41	0,00	1,34	1,33
Zeínas (diferencias entre modelos de los componentes de variancia)		-100%	100%	25%	21%

Nota: Z = fracciones de zeínas; T = tratamientos de nitrógeno; G = Genotipos; A = Ambientes; GxA = interacción genotipo-ambiente; Err= error residual.

El contenido de proteína total estuvo, en parte explicado por las distintas zeínas y sus fracciones, las cuales explicaron un 25% de la varianza ambiental y un 21% de la varianza del error (Tabla 4). Dentro del mismo modelo, las fracciones de zeínas y sus interacciones que mostraron un mayor efecto sobre el contenido de proteína fueron las zeínas E, Z1xE, Z1xC2, C2, y C2xE (Fig. 3). Esto indica que el efecto de cada fracción sobre el contenido de proteína depende del nivel de las demás fracciones presentes. Esto respalda un enfoque de análisis por interacciones antes que por correlaciones simples para entender el rol de las zeínas sobre la calidad del grano.

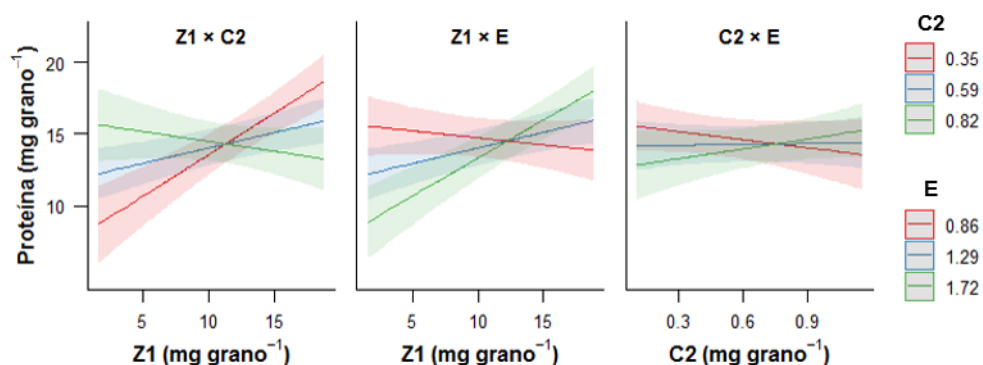


Figura 3. Relación entre el contenido de las zeínas Z1 y C2 con el contenido de proteína en grano, teniendo en cuenta las interacciones con otras fracciones de zeínas.

Conclusión

Los resultados obtenidos muestran que los atributos fisicoquímicos del grano se asocian de diferente manera con la calidad industrial del maíz pisingallo. La densidad de grano se relaciona positivamente con la expansión y depende del genotipo, mientras que su relación con el K10 fue negativa y consistente entre genotipos. El contenido de proteína se asoció positivamente con la densidad del grano, es decir que mejora la dureza de este. A nivel de fracciones proteicas, las zeínas C1 y C2 explicaron gran parte de la variación de la expansión. El contenido de proteína dependió de las interacciones entre las fracciones de zeínas. En conjunto, estos resultados permiten profundizar en la relación entre la composición del grano con la calidad industrial del maíz pisingallo.

Esto sugiere que la composición de zeínas podría considerarse como un criterio útil para la selección de genotipos y estrategias de manejo orientadas a mejorar la expansión del maíz pisingallo.

Referencias bibliográficas

Balbi, C.; Neiff, N.; Cirilo, A. 2014. Genotipo, densidad de plantas y fecha de siembra en maíz pisingallo: variaciones en rendimiento y calidad de grano. FACENA 30: 27-33.

Borras, F.; Seetharaman, K.; Yao, N.; Robutti, J. L.; Percibaldi, N. M.; Eyherabide, G. H. (2006). Relationship between popcorn composition and expansion volume and discrimination of corn types by using zein properties. Cereal Chemistry 83: 86–92.

Caballero-Rothar N.N., Abdala L.J., Borrás L., Gerde J.A. (2019) Role of yield genetic progress on the biochemical determinants of maize kernel hardness. Journal of Cereal Science 87:301-310.

Gerde, J.A., S. Tamagno, J.C. Di Paola, Borrás, L. (2016). Genotype and nitrogen effects over maize kernel hardness and endosperm zein profiles. Crop Sci. 56:1225–1233.

Millet, E. J., Welcker, C., Kruijer, W., Negro, S., Coupel-Ledru, A., Nicolas, S. D., ... Tardieu, F. (2016). Genome-wide analysis of yield in Europe: Allelic effects vary with drought and heat scenarios. Plant Physiology, 172, 749–764.

Tamagno, S.; Greco, I.A.; Almeida, H.; Di Paola, J.C.; Martí Ribes, F.; Borrás, L. (2016). Crop management options for maximizing maize kernel hardness. Agronomy Journal 108: 1561-1570.