

RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ TARDÍO ANTE LA MODIFICACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA Y EL MOMENTO Y DOSIS DE APLICACIÓN DE NITROGENO

Cantarero, M.G.¹; Luque, S.F.¹; Canal, G.¹; Zgrablich, S.¹; Viotti, G.¹

¹Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Cereales y Oleaginosas, Córdoba, Argentina.

mcantare@agro.unc.edu.ar

RESUMEN

En los últimos años el maíz se ha posicionado en el centro y norte de Córdoba como uno de los cultivos más importantes. El manejo del cultivo se ha caracterizado principalmente por la adopción de materiales genéticos de alto potencial de rendimiento, la aplicación de fertilizantes nitrogenados y en el retraso de la fecha de siembra hacia el mes de diciembre. En consecuencia, el objetivo de este trabajo fue evaluar en dos situaciones de oferta hídrica (riego y seco) la respuesta del rendimiento de maíz de siembra tardía a la fertilización nitrogenada, combinando dosis únicas o divididas en diferentes momentos del ciclo del cultivo. El rendimiento promedio en la condición con riego fue cerca del doble que el encontrado en seco (1554 vs 814 g m⁻² respectivamente). Solo se encontraron respuestas de los tratamientos de fertilización en la situación con riego. En este caso los mayores rendimientos se obtuvieron con la dosis más alta (200 kg N ha⁻¹) independientemente de cómo se haya aplicado el fertilizante. No obstante, cuando la dosis mayor fue dividida entre la siembra y al estado V₈ se obtuvo una mayor eficiencia agronómica del N aplicado.

Palabras clave: Maíz Tardío– Fertilización Nitrogenada – Rendimiento – Componentes Numéricos

INTRODUCCIÓN

Según estimaciones del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (MAGYP, 2020) la provincia de Córdoba es la principal productora de maíz de Argentina. En los últimos diez años ha participado a nivel nacional con el 30% de la superficie sembrada y con el mismo valor en nivel de producción, siendo el rendimiento promedio alcanzado en esa década del orden de 7000 kg ha⁻¹. En el centro y norte de Córdoba, el nivel tecnológico en el manejo del cultivo se ha caracterizado principalmente por la adopción de materiales genéticos de alto potencial de rendimiento, la mejora en los niveles de aplicación de fertilizantes, sobre todo los de tipo nitrogenado y en el retraso de la fecha de siembra hacia el mes de diciembre. Esta última práctica combina una adecuada recarga hídrica del perfil al momento de la siembra con menor demanda de agua durante el ciclo y menor riesgo de golpes de calor durante la floración. Si bien estas prácticas están muy aceptadas por los productores, algunas de ellas, como el manejo de la fertilización nitrogenada, necesitan estudiarse con mayor detalle.

El N tiene un rol importante en la dinámica de generación de biomasa puesto que condiciona la eficiencia de captura y uso de la radiación por parte del canopeo. Su deficiencia generalmente ocasiona menor área foliar y mayor nivel de senescencia, lo que trae como consecuencia menor captura de luz. Por su parte,

el N es un importante componente de la clorofila y su deficiencia ocasiona caídas en la eficiencia de conversión de la radiación solar en materia seca. Por consiguiente, es necesario mantener una adecuada oferta de N para sostener una alta tasa de crecimiento del cultivo, en particular durante el período donde se determina el número de granos por unidad de superficie, y la etapa de definición del peso individual del grano, denominados período crítico y período de llenado del grano respectivamente.

El N disponible para el cultivo proviene de tres fuentes: a) N atmosférico (N₂), principal fuente de N que representa aproximadamente 78% de la composición del aire; en este caso las plantas no pueden absorber directamente el N₂ del aire y este debe ser fijado por microorganismos de vida libre o simbióticos; b) la materia orgánica del suelo, desde donde se libera gradualmente durante el ciclo del cultivo, a partir del proceso de mineralización, cantidades que pueden ser suficientes o no para garantizar altos niveles de rendimiento; y c) a partir de la aplicación de fertilizantes. En este último caso, la adecuación de la dosis y el momento de aplicación son dos factores que pueden garantizar tanto el logro del rendimiento máximo, como así también promover una mayor eficiencia de uso de otros recursos como la radiación y el agua.

En el sistema suelo-planta-atmósfera, el N es un nutriente móvil y tiene la particularidad de estar sometido a procesos de mineralización e inmovilización.

Además, pueden ocurrir pérdidas por volatilización, desnitrificación o lixiviación. De estas pérdidas, la primera es la más importante y puede ocurrir con mayor intensidad cuando se utilizan fertilizantes de tipo amoniacal, como la urea, aplicados en altas dosis al voleo y en condiciones de suelos húmedos en superficie y con alta cobertura de rastrojo. Estas condiciones son normales en el mes de diciembre en el centro y norte de Córdoba, momento en que se realiza la mayor proporción de las siembras de maíz en esa región.

Existen varias alternativas que pueden mitigar las pérdidas de N, y por lo tanto aumentar la eficiencia de su uso. Entre ellas pueden mencionarse las siguientes: a) la incorporación del fertilizante; b) el uso de urea de liberación lenta (formulada con inhibidores de la actividad ureásica o que retardan la hidrólisis); c) el uso de fertilizantes no amoniacales; d) el uso de riego luego de una aplicación al voleo o ferti-riego; e) la ocurrencia de lluvias inmediatas luego de aplicaciones al voleo; y f) la división de la dosis durante el ciclo de manera de acompañar la demanda de N del cultivo. De estas alternativas, la última puede mejorar la eficiencia agronómica del N (kg grano/kg N aplicado) si se la compara con una dosis única aplicada al momento de la siembra. En este último caso, existe poca información local que permita cuantificar la respuesta del rendimiento en el cultivo de maíz cuando se usan dosis únicas o divididas del fertilizante.

En consecuencia, el objetivo del trabajo fue evaluar en dos situaciones de oferta hídrica (riego y secano) la respuesta del rendimiento de maíz de siembra tardía a la fertilización nitrogenada, combinando dosis únicas o divididas en diferentes momentos del ciclo del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la campaña 2019/20 se sembró un experimento en el Campo Escuela de la FCA-UNC en donde se combinaron dos niveles hídricos (secano y riego) con dosis únicas o divididas de N. El diseño experimental fue de parcelas subdividida con tres repeticiones, en donde la parcela principal fue el nivel hídrico (riego y secano) y la subparcela el tratamiento de N. Los tratamientos de N fueron:

- 67 kg N ha⁻¹ a la siembra (S₆₇)
- 100 kg N ha⁻¹ a la siembra (S₁₀₀)
- 200 kg N ha⁻¹ a la siembra (S₂₀₀)
- 100 kg N ha⁻¹ a la siembra + 100 kg N ha⁻¹ en V₈ (S-V8₂₀₀)
- 67 kg N ha⁻¹ a la siembra + 67 kg N ha⁻¹ en V₈ + 67 kg ha⁻¹ en R₁ (S-V8-R1₂₀₀)

La fuente de N fue urea. Las aplicaciones a la siembra se incorporaron con el equipo de siembra, y las dosis en V₈ y R₁ se aplicaron manualmente en superficie al costado de la hilera de plantas.

La fecha de siembra fue el 16 de diciembre de 2019 y el cultivo antecesor fue trigo. El híbrido utilizado fue Dow 22,6 PW de ciclo completo y de buen comportamiento en la región. Cada unidad experimental fue de 18 surcos distanciados a 0,52 m y de 7 m de largo. La densidad fue de 8,2 pl m⁻². El sistema de riego utilizado fue el de goteo subterráneo y las láminas aplicadas durante el ciclo del cultivo fueron medidas a través de un caudalímetro (**Tabla 1**).

Tabla 1. Radiación global (RG), temperaturas mínima (Tmin), máxima (Tmax) y media (Tmed), precipitación (PP), evapotranspiración (ET₀) y lámina de riego durante las etapas de siembra a R1 (S-R1) y R1 a madurez fisiológica (R1-MF) para el nivel hídrico en secano y riego.

Variable climática	Nivel Hídrico			
	Secano		Riego	
	S-R1	R1-MF	S-R1	R1-MF
RG (MJ/m ²)	23,2	19,6	23,2	18,6
Tmin (°C)	18,5	15,8	18,5	14,8
Tmax (°C)	30,9	29,1	30,9	28,1
Tmed (°C)	24,7	22,1	24,7	21,1
PP (mm)	255	84	251	105
ET ₀ (mm)	5,3	4,1	5,4	3,8
Lámina de riego (mm)	0	0	175	124

Se registraron los estados fenológico de V₈, R₁ y R₆ de acuerdo a la clave de Ritchie y Hanway (1982) sobre 5 plantas que fueron marcadas dentro de cada parcela. Al momento de madurez se cosecharon las espigas de 5 surcos de 3 m de largo y se determinó la materia seca total a partir de 5 plantas por parcela (PST). Las espigas y

las plantas fueron secadas en estufa a 65°C hasta peso constante. Luego las espigas fueron trilladas y se pesó el grano. El peso individual del grano (PG) surgió de una muestra de 250 granos, y el número de granos por unidad de superficie (NG) se calculó como el cociente entre el rendimiento en base seca (0% de humedad) y

PG. El índice de cosecha se calculó como el cociente entre el rendimiento en base seca (0% de humedad) y el PST. El rendimiento de cada tratamiento se presenta ajustado a la humedad de comercialización (14%, **Tabla 4**).

Los datos climáticos fueron registrados en una estación meteorológica ubicada a 100 m del experimento. La evapotranspiración (ET_0) fue calculada por el método Penman-Monteith FAO 56 con el *soft* Agroclima (Abbate, 2004). También, se realizaron muestreos en el momento de la siembra para determinar la fertilidad inicial del suelo, tanto en el sector de secano como en el de riego.

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y cuando existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos ($p < 0,10$), estas se compararon con el método DGC. Para estos análisis se utilizó el *software* Infostat (Di Rienzo et al., 2019).

RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización climática de la campaña

En la **Tabla 1** se presentan las características climáticas durante la campaña para los dos niveles hídricos durante las etapas pre y pos floración. Como se aprecia, todas las variables fueron menores en la etapa posfloración, en

particular las precipitaciones. El cultivo en la condición de secano estuvo sometido a mayor estrés hídrico durante la etapa de llenado de granos. En la condición con riego la oferta hídrica fue de casi el doble que en secano (655 vs 339 mm respectivamente; **Tabla 1**).

Según Dardanelli et al. (2004) la demanda de agua del cultivo de maíz creciendo sin limitaciones hídricas en Córdoba, se ubica entre los 500 y 600 mm, lo que indica que se cubrieron satisfactoriamente los requerimientos en este experimentos y las condiciones hídricas permitieron expresar el rendimiento potencial. Por el contrario, en secano el cultivo estuvo sometido a estrés hídrico y este pudo haber operado con mayor magnitud desde floración en adelante.

Análisis de fertilidad del suelo al momento de la siembra

En la **Tabla 2** se muestran las principales variables que caracterizan la fertilidad química del suelo. Considerando una densidad aparente de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$, la disponibilidad de N inicial para la capa de 0-60 cm de profundidad fue mayor en la condición de secano respecto a la de riego (142 vs 94 kg N ha^{-1} respectivamente).

Tabla 2. Análisis de fertilidad del suelo al momento de la siembra del cultivo en los dos niveles hídricos.

	Secano		Riego	
	0-20	20-60	0-20	20-60
Prof (cm)	0-20	20-60	0-20	20-60
MOS (%)	2,62	--	2,33	--
C_{org} (%)	1,52	--	1,35	--
N_{total} (%)	0,15	--	0,14	--
Relación C:N	9,91	--	10,0	--
N-NO₃ (ppm)	28,0	14,4	18,3	9,6
S-SO₄ (ppm)	5,24	--	7,6	--
P_{Bray} (ppm)	61,2	--	46,0	--
pH_{actual}	7,30	7,55	8,03	8,41
CE (dS/m)	0,73	0,58	0,75	0,69

Prof: profundidad del suelo; MOS: Materia orgánica del suelo; C_{org}: Carbono orgánico del suelo; N_{total}: Nitrógeno orgánico total; CE: Conductividad eléctrica.

Fenología

En la **Tabla 3** se presenta la duración de las etapas fenológicas para los dos niveles hídricos. El estado fenológico de R₁ ocurrió 3 días más tarde en secano respecto al riego. Este retraso en la emergencia de estigmas pone de manifiesto un mayor nivel de estrés en secano. En maíz se ha demostrado que ante aumentos en los niveles de estrés hídrico se incrementan los

valores de protandria. Por su parte, el período R₁-R₆ fue 26 d menor en secano respecto al riego, lo que pone en evidencia un efecto marcado del estrés en esta etapa, y como se verá más adelante un impacto importante sobre el PG en esa condición.

No se encontraron diferencias significativas en la duración de las fases por efecto de los tratamientos de N.

Tabla 3. Duración de las etapas de siembra a emergencia (S-E), emergencia a R1 (E-R1), R1 a madurez fisiológica (R1-R6) y de siembra a madurez fisiológica para los dos niveles hídricos (Riego y Secano).

Nivel Hídrico	Período (días)			
	S-E	E-R ₁	R1-R ₆	S-R ₆
Riego	6 a	52 b	68 a	126 a
Secano	6 a	55 a	42 b	103 b

En cada columna letras distintas indican deferencias estadísticamente significativas (p<0,10)

Rendimiento y componentes

Tanto para el PST, Rend, NG y PG la interacción entre el nivel hídrico y el tratamiento (NH × Trat) fue significativa (**Tabla 4**). Para estas variables, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en la condición de secano, pero sí las hubo en la condición con riego. La ausencia de respuesta del rendimiento de los tratamientos de fertilización en secano pueden deberse al mayor grado de estrés hídrico experimentado por el cultivo en esta condición (**Tabla 1**) y al mayor nivel de

fertilidad inicial del suelo (**Tabla 2**). El rendimiento promedio a través de tratamientos en secano fue de 814 g m⁻². Según García y Correndo (2011), los requerimientos de N para alcanzar ese rendimiento serían de 154 kg de N ha⁻¹, y en esa condición el N mineral inicial (N-NO₃⁻) fue de 142 kg ha⁻¹ (**Tabla 2**), lo que hace suponer que esa oferta inicial más el aporte por mineralización durante el ciclo fueron suficientes para garantizar esos niveles de producción.

Tabla 4. Peso seco total a madurez fisiológica (PST), rendimiento al 14% de humedad (Rend), índice de cosecha (IC), número de granos por unidad de superficie (NG) y peso individual del grano (PG) y eficiencia de uso del agua (EUA) para cada nivel hídrico (NH) y tratamientos (Trat).

NH	Trat	PST	Rend	IC	NG	PG
		----- (g/m ²) -----	-----	(%)	(#/m ²)	(mg)
Riego	S ₆₇	2387 c	1439 b	51,6 a	4941 b	249 b
	S ₁₀₀	2220 c	1297 b	49,6 a	4137 c	268 a
	S ₂₀₀	2940 a	1679 a	49,1 a	5103 b	283 a
	S-V8 ₂₀₀	2710 b	1767 a	56,3 a	5762 a	264 a
	S-V8-R1 ₂₀₀	2665 b	1588 a	51,2 a	5026 b	272 a
Secano	S ₆₇	1637 d	904 c	47,4 a	4072 c	190 c
	S ₁₀₀	1604 d	799 c	43,0 a	3946 c	174 c
	S ₂₀₀	1455 d	815 c	48,1 a	3819 c	183 c
	S-V8 ₂₀₀	1737 d	791 c	39,0 a	4120 c	165 c
	S-V8-R1 ₂₀₀	1570 d	761 c	41,9 a	4001 c	163 c
Riego	---	2584	1554	53,6	4994	267
Secano	---	1600	814	43,9	3991	175
---	S ₆₇	2012	1171	49,5	4507	219
---	S ₁₀₀	1912	1048	46,3	3994	223
---	S ₂₀₀	2126	1237	49,8	4536	228
---	S-V8 ₂₀₀	2295	1289	46,5	4808	222
---	S-V8-R1 ₂₀₀	2117	1175	46,6	4513	217
NH		*	*	ns	*	*
Trat		*	ns	ns	*	*
NH × Trat		*	*	ns	*	*

En cada columna letras distintas indican deferencias estadísticamente significativas (p<0,10)

El PST alcanzado en la condición con riego fue 60% mayor que el logrado en secano (promedio a través de tratamientos; **Tabla 4**). Con riego, el PST fue mayor para el tratamiento S₂₀₀, intermedio para S-V8₂₀₀ y S-V8-R1₂₀₀ y menor para S₆₇ y S₁₀₀.

El rendimiento promedio a través de tratamientos en la condición con riego fue cerca del doble que el

encontrado en secano (1554 vs 814 g m⁻² respectivamente). El mayor rendimiento bajo riego se obtuvo con los tratamientos S-V8₂₀₀, S₂₀₀ y S-V8-R1₂₀₀ y los menores con S₆₇ y S₁₀₀ (**Tabla 4**).

Al considerar en la condición con riego los tratamientos que involucraron la dosis única de 200 kg N ha⁻¹ y los tratamientos de dosis divididas (S-V8₂₀₀ y S-V8-R1₂₀₀),

pueden estimarse las eficiencias agronómicas de uso de N (EUN; kg de grano ha⁻¹ por kg N ha⁻¹ aplicado) como la relación entre la ganancia de rendimiento respecto a la dosis más baja (S₆₇) y la cantidad de N aplicado. El tratamiento de mayor EUN fue S-V8₂₀₀ con 25 kg de grano por unidad de N aplicado, luego se ubica S₂₀₀ con 18 y por último S-V8-R1₂₀₀ con 11. Si bien no se observaron diferencias significativas en rendimiento para estos tres tratamientos, la práctica de dividir la dosis entre la siembra y el estado de V₈ mejoró sustancialmente la EUN. La menor respuesta de S-V8-R1₂₀₀ puede deberse a que luego de la aplicación del fertilizante en R₁ no se produjeron precipitaciones de importancia para la incorporación del N del fertilizante (**Tabla 1**). Esto podría haberse mejorado con el riego, pero en este experimento el sistema de goteo subterráneo posee las mangueras a una profundidad de 30 cm, lo que no contribuyó seguramente a su óptima incorporación, y parte de la dosis aplicada en ese estado fenológico no tuvo una incorporación adecuada o sufrió pérdidas por volatilización.

No se encontraron diferencias significativas en el IC entre niveles hídricos ni entre tratamientos. En general, el Rend estuvo más asociado con el PST que con el IC (R²=0,89 vs R²=0,60 respectivamente; p<0.05).

El NG y el PG fueron mayores en la condición con riego, siendo un 26 y 51% mayor en esa condición, respectivamente (**Tabla 4**). Entre niveles hídricos el NG explicó mejor las variaciones en Rend en la condición con riego (R²=0,90; p<0.05), mientras que en seco el componente mejor asociado con Rend fue PG (R² = 0,89; p<0.05). Esto se relaciona con el mayor estrés hídrico experimentado durante el período de llenado en la condición de seco (menor oferta hídrica; **Tabla 1**), lo que motivó una reducción significativa en la duración de la fase R1-MF (**Tabla 3**), y sugiere que la menor fuente de asimilados en esa condición fue responsable del menor PG. Por el contrario, bajo riego, la mayor asociación del Rend con NG estaría demostrando que la limitante principal fue la cantidad de destinos reproductivos.

Por su parte, se encontró una interacción NH × Trat significativa tanto para NG como para PG. Al respecto, no se encontraron diferencias significativas de NG y PG entre tratamientos en seco; mientras que bajo riego, el mayor NG fue para el tratamiento S-V8₂₀₀ y el menor PG para el tratamiento S₆₇ (**Tabla 4**).

CONCLUSIONES

En general, todas las variables evaluadas a nivel de cultivo fueron mayores cuando se mejoró la oferta hídrica con riego. También existieron interacciones significativas entre el nivel hídrico y los tratamientos de

fertilización. La mayor variabilidad del rendimiento y componentes numéricos frente a la estrategia de fertilización fue encontrada en la condición con riego. Al respecto, el tratamiento S-V8₂₀₀ fue uno de los que mostró mejoras importantes en la eficiencia de uso de N. Si bien las condiciones de estrés hídrico, que caracterizó a la campaña durante el período de llenado, impidieron una adecuada respuesta en la aplicación tardía de N, por ejemplo en R₁, la estrategia de dividir la dosis puede ser una alternativa superadora para obtener mejores resultados productivos cuando se dispone de ambientes con adecuada oferta hídrica, sea porque mejoran las precipitaciones durante el ciclo o porque se dispone de riego suplementario. En condiciones de estrés hídrico creciente en la estación, por el contrario una mejor alternativa parece ser la de adecuar los niveles de fertilización al momento de la siembra.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbate P.E. 2004. Agroclima: a program for calculating evaporation by the FAO Penman-Monteith method from spreadsheets or programming languages (In Spanish). In G. Murphy, editor. Proceedings of the 10th Argentina and 4th Latin American Meeting of Agrometeorology. Mar del Plata, Argentina. 13-15 Oct. Paper 238.
- Dardanelli J., Collino D., Otegui M.E. y Sadras V. 2004. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: Satorre, E. H., Benech Arnold, R. L., Slafer, G. A., De la Fuente, E. B., Miralles, D. J., Otegui, M. E., & Savin, R. (2004). Producción de granos. Bases funcionales para su manejo (No. F01 AGR 17624). Editorial Facultad Agronomía.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M y Robledo C.W. InfoStat versión 2019. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- García F., y Correndo A. 2011. Planillas para el Cálculo de Requerimientos Nutricionales. <http://ipni.net/article/LACS-1024>.
- MAGyP. 2017. Estimaciones Agrícolas. Publicado en internet. <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Activo junio de 2020.
- Ritchie, S. W., and J. J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa Coop. Ext. Serv. Spec. Rep. 48.