



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA

Ingeniería Agronómica

**EFFECTO DEL MANEJO DE DENSIDAD, GENOTIPO Y
NITROGENO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE MAIZ DE
PRIMERA EN EL NOROESTE BONAERENSE**

**Trabajo final de graduación para optar por el título de:
Ingeniero Agrónomo**

Autor: Aureliano Garcia Calvo

Tutores: Ing. Agr. Walter Miranda (EEA INTA General Villegas)
Ing. Agr. (MSc) Mirian Barraco (EEA INTA General Villegas)

Fecha de defensa: 2023

ÍNDICE

Resumen.....	3
Agradecimientos.....	4
Introducción.....	5
Hipótesis.....	8
Objetivos.....	8
Materiales y métodos.....	9
Manejo del sitio.....	9
Determinaciones.....	9
Diseño experimental y análisis estadístico.....	10
Resultados.....	12
Caracterización climática.....	12
Índice de verdor de los cultivos en floración.....	14
Biomasa.....	16
Biomasa planta ⁻¹	16
Biomasa ha ⁻¹	17
Rendimiento.....	19
ACA 473.....	19
AX 7761.....	21
DK 7220.....	22
Discusión y conclusiones.....	24
Bibliografía.....	26

RESUMEN

La producción del cultivo de maíz depende de varios factores vinculados al manejo como la densidad de siembra, la disponibilidad de nutrientes y la elección del genotipo, entre otros. El nitrógeno (N) es el nutriente más condicionante del rendimiento del cultivo. El objetivo general de este trabajo fue evaluar diferentes combinaciones de densidad de siembra, dosis nitrogenada y genotipo en maíces de siembra temprana en el noroeste bonaerense. El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Gral. Villegas. Se evaluaron 4 densidades de siembra: 50000, 80000, 110000 y 160000 plantas ha^{-1} , 4 dosis de N: 0, 60, 120 y 240 kg N ha^{-1} y 3 genotipos: ACA 473, AX 7761 y DK 7220. Se midió el índice de verdor (IV) de la hoja de la espiga, la producción de biomasa y el rendimiento del cultivo de maíz. La campaña se caracterizó por tener adecuadas precipitaciones, sobre todo en el periodo crítico de los cultivos. El IV vario entre 37 y 63 unidades de spad, observándose una interacción entre densidad de siembra, dosis nitrogenada y genotipo. En los 3 genotipos el IV se modificó en mayor magnitud por la densidad de siembra que por la dosis de N. La producción de biomasa ha^{-1} vario entre 12281 y 18988 kg ha^{-1} , observándose diferencias entre híbridos y densidades de siembra. En promedio la menor biomasa fue para AX 7761 y dentro de cada híbrido para la densidad de 50000 plantas ha^{-1} . El rendimiento del cultivo vario entre 9826 y 15729 kg ha^{-1} , observándose interacción entre densidad de siembra, dosis nitrogenada y genotipo. En ACA 473 y DK 7220 los mayores rendimientos se obtuvieron con dosis de N de 240 kg N ha^{-1} , mientras que en AX 7761 el máximo rendimiento se alcanzó con 215 kg N ha^{-1} . En cuanto a la densidad de siembra, los rendimientos medios más altos en el ACA 473 y AX 7761 se obtuvieron con 110000 pl ha^{-1} , mientras que en el DK 7220 se obtuvieron con la densidad de 160000 pl ha^{-1} . Estos resultados se obtuvieron en una campaña y localidad específica por lo que se requiere intensificar estos estudios en otras campañas y localidades.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, Miran Barraco y Walter Miranda por brindarme todo su conocimiento y dedicación para la realización de esta tesis.

A todas las personas que trabajan en la Estación experimental INTA General Villegas.

A la Universidad Católica Argentina, que me ayudo a formarme como persona y profesional a lo largo de todo el proceso.

A mi familia por acompañarme en todo momento y brindarme la posibilidad de estudiar.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*) es el cultivo con mayor producción a nivel mundial. En el año 2019 se produjeron unas 1.148 millones de toneladas en una superficie de 197 millones de hectáreas (FAO, 2019).

En Argentina, la superficie sembrada es de alrededor de 6,2 millones de hectáreas, mientras que la producción anual en la campaña 2019/2020 fue de unas 50 millones de toneladas, lo que posiciona al país como el 4º productor de mayor importancia a nivel mundial (FAO, 2019). En cuanto al destino de los granos producidos, según el reporte de la Bolsa de Comercio de Rosario (2020), del total de las toneladas producidas, 33,5 millones fueron destinadas a la exportación como materia prima (67%), mientras que el resto de la producción fue utilizada principalmente para alimentación animal (12,4 millones de toneladas), y en menor medida para industria y producción de etanol.

Según el censo nacional agropecuario (2018), Córdoba es la provincia con mayor superficie destinada al cultivo de maíz, seguida por la provincia de Buenos Aires. En lo que respecta a esta última, se distinguen distintos tipos de estrategias en cuanto al modelo productivo dependiendo de la región. En el norte de la provincia, las condiciones climáticas y edáficas permiten obtener altos rendimientos en general. A medida que nos desplazamos hacia el sur, los rendimientos potenciales disminuyen considerablemente, debido a un menor fotoperiodo y temperaturas más bajas en la etapa de llenado de granos, entre otras causas. En condiciones más favorables se suele optar por un planteo de mayor inversión inicial, esperando un mayor retorno. Lo opuesto suele ocurrir en regiones más desfavorables por cuestiones climáticas o de suelo, donde se suele reducir la inversión inicial optando por densidades más bajas, menores dosis de fertilizante, e híbridos de menor potencial.

La productividad del cultivo de maíz se ve condicionada por varios factores. Mediante prácticas de manejo como la elección de la fecha de siembra, el genotipo, la fertilización y la densidad de siembra se puede modificar el comportamiento del cultivo. Para poder ajustar estas variables con mayor precisión es necesario adecuarse a los distintos ambientes, conociendo las principales limitantes y potencialidades de cada zona en particular. El resultado final del cultivo es la consecuencia de las múltiples interacciones que tiene con el ambiente que lo rodea (Cirilo et al., 2015)

La fecha de siembra es un aspecto fundamental que condiciona la productividad del cultivo. En el país existe una tendencia creciente a optar por fechas de siembra tardías para ubicar el periodo crítico de floración en mejores condiciones hídricas. Según el informe de la Bolsa de Comercio de Rosario (2022), de la totalidad de las hectáreas sembradas con maíz, el 36% corresponde a fechas de siembra tardías. Sin embargo, corresponde destacar que siembras tempranas generalmente exploran mejores ambientes fototermales y, consecuentemente, tenderán a presentar mayores rendimientos potenciales (Otegui, 2003).

La principal limitante en cultivos de secano es la disponibilidad de agua que depende del agua almacenada en el suelo y de las precipitaciones que ocurren durante el ciclo

del cultivo. Otro factor que limita en gran medida la producción de maíz es el nitrógeno (N) (Maddonni et al., 2003; Echeverría et al., 2015). Las deficiencias de N reducen la producción de biomasa, ya que disminuye la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y la eficiencia con que este convierte dicha radiación interceptada en biomasa (Uhart & Andrade, 1995). Al aumentar la producción de biomasa, se incrementa el índice de área foliar y, por ende, la capacidad fotosintética de la planta. El cultivo de maíz absorbe en promedio unos 22 kg de N ha⁻¹ (IPNI, 2016), por lo tanto, para obtener un rinde de 10 toneladas necesita absorber unos 220 kg de N ha⁻¹, bajo condiciones no limitantes de otros nutrientes. La dosis óptima económica (DOE) de fertilizante, es la cantidad de insumo que maximiza la renta del cultivo (Pagani et al., 2008). Se han realizado numerosos estudios con el fin de determinar una dosis óptima de fertilización nitrogenada, no obstante, la variabilidad entre los distintos ambientes hace bastante compleja la determinación de una dosis óptima uniforme. Conociendo el potencial de cada lote y mediante un muestreo de nitratos en el suelo previo a la siembra se logra una mayor precisión a la hora de elegir la dosis nitrogenada (Salvagiotti et al., 2011).

La densidad de siembra es otra de las prácticas de manejo que permite definir la capacidad del cultivo de interceptar recursos como la radiación, el agua o los nutrientes (Kruk & Satorre, 2003). El maíz, a diferencia de otros cultivos, tiene menor plasticidad en cuanto a la densidad de siembra. Debido a esto, resulta muy importante elegir la densidad de siembra que sea la más adecuada para determinado ambiente. Un factor clave a tener en cuenta en la elección de la densidad de siembra es la condición hídrica y nutricional del suelo. En suelos de alta fertilidad y en años donde las condiciones hídricas resultan óptimas, se podría hipotetizar que un aumento de la densidad de siembra contribuiría a la obtención de mayores rendimientos. En condiciones subóptimas de humedad o en lotes de menor potencial, se podría optar por reducir la densidad de siembra ya que cada planta va a disponer de menor cantidad de recursos para su crecimiento. La densidad óptima en maíz es la menor densidad que posibilita maximizar el rendimiento en grano. Esta densidad depende de la plasticidad vegetativa y reproductiva de cada cultivar (Sarlangue et al., 2007). También se debe tener en cuenta que hay híbridos más prolíficos que otros. Es decir, que en planteos de bajas densidades tienen la capacidad de desarrollar una segunda espiga viable que contribuya a aumentar el rinde. En un trabajo realizado en el sudoeste bonaerense (Gutiérrez Parada, 1999), donde se evaluó la interacción entre la fertilización nitrogenada y la densidad de siembra, se concluyó que la densidad de siembra es dependiente de otros factores como el caso del híbrido. También se demostró la importancia de ajustar correctamente los modelos de N y elegir acertadamente el material genético en búsqueda de optimizar el uso de recursos y obtener mejores rendimientos.

Dada la variabilidad en la productividad de los suelos del noroeste de la provincia de Buenos Aires (SAGYP-INTA 1989) y los diferentes sistemas de producción (agrícolas puros, mixtos agrícolas-ganaderos o tamberos) los cultivos de maíz se siembran tanto en fechas tempranas como tardías en proporciones casi equivalentes y bajo diferentes prácticas de manejo. Al igual que en el resto de la región pampeana los

ambientes de mayor productividad (generalmente en suelos profundos) se destinan a siembras tempranas comprendidas entre mediados de septiembre-mediados de octubre. Antecedentes previos muestran que los rendimientos de maíz en la región logran maximizarse cuando la disponibilidad de N (N suelo + N fertilizante) supera los 140 kg N ha⁻¹ (Barraco & Díaz Zorita, 2005). Mientras que estudios desarrollados por Miranda et al., (2017) muestran respuestas diferenciales a la densidad según el híbrido. Sin embargo, no existe información regional donde se evalué la interacción de estos factores. Por lo tanto, resulta de interés en este estudio evaluar el comportamiento de maíz de primera frente a modificaciones en la densidad de siembra, dosis de N y genotipos.

HIPÓTESIS

En este trabajo de tesis se plantean las siguientes hipótesis:

- (i) Existe respuesta significativa al agregado de nitrógeno sobre el rendimiento.
- (ii) Existe efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento.
- (iii) Existe efecto del genotipo sobre el rendimiento.
- (iv) Existe interacción entre las diferentes estrategias de manejo sobre el rendimiento.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de diferentes variables de manejo sobre la productividad del cultivo de maíz en el noroeste bonaerense.

Objetivos específicos

Evaluar el efecto de la dosis de N, densidad y genotipo sobre el índice de verdor y el rendimiento del cultivo.

Evaluar el efecto de la densidad y el genotipo sobre la producción de biomasa de maíz bajo condiciones no limitantes de N.

MATERIALES Y MÉTODOS

Manejo del sitio:

El ensayo se desarrolló en la campaña 2019-2020, en la EEA General Villegas sobre un suelo Hapludol Típico (Arena= 580 g kg⁻¹, MO= 22,0 g kg⁻¹, P Bray= 8,4 mg kg⁻¹, pH= 5,9), con una capacidad de retención de agua en 200 cm de 270 mm y con la presencia de una capa de calcrete discontinua entre los 220-250 cm. El lote se manejó en siembra directa y bajo agricultura continua por más de 18 años y previo a la instalación del ensayo presentaba como antecesor una secuencia centeno rolado como cultivo de cobertura/soja de primera.

Previo a la siembra del ensayo, se realizó una determinación de N-nitrato en el suelo (0-60 cm). Se partió con un nivel de N de 128 kg ha⁻¹.

Se evaluó el efecto de 3 factores: densidad de siembra, dosis de N y genotipo.

i) Densidades: 50000, 80000, 110000 y 160000 semillas ha⁻¹.

ii) Dosis de N: 0, 60, 120 y 240 kg N ha⁻¹.

iii) Genotipos: ACA 473, DK 7220 y AX 7761.

Los cultivos de maíz se sembraron el día 9/10/2019, con la aplicación de 28 kg P ha⁻¹ en forma de fosfato monoamónico (9-52-0), incorporado al costado de la línea de siembra, mientras que las dosis de N se aplicaron manualmente al voleo en el estadio V4 de los cultivos en forma de urea (46-0-0).

Determinaciones:

Se realizó un seguimiento del cultivo a lo largo del ciclo fenológico. Se marcaron 10 plantas con aerosol en cada parcela, evitando las plantas de los bordes para que se exprese de la mejor manera posible el efecto de cada tratamiento. En distintas etapas del cultivo se procedió a la toma de datos:

En cada una de las plantas marcadas se realizó una medición de índice de verdor mediante el medidor de clorofila SPAD (Minolta-502). Dicha medición se realizó en las hojas correspondientes a la inserción de la espiga. Esta medición se relaciona con el status nitrogenado del cultivo (Wolfe et al., 1988).

15 días posteriores a la floración, se realizó una estimación de biomasa mediante un modelo alométrico no destructivo (Borras & Otegui, 2001). Este modelo se implementó solo para aquellos tratamientos con la dosis de 240 kg N ha⁻¹ con el objetivo de determinar si existen diferencias entre genotipos y densidades ante condiciones no limitantes de N. Se seleccionaron y cortaron al azar 12 plantas de cada híbrido, 4 de tamaño medio, 4 de tamaño superior al promedio, y 4 de tamaño inferior al promedio. En las plantas cortadas se realizaron las mediciones morfométricas necesarias para poder realizar el modelo. El diámetro de la base del tallo, al no ser perfectamente circular, se determinó realizando dos mediciones con un calibre en los primeros nudos de la planta (una medición en la parte de mayor grosor y otra en la de menor grosor). Se realizó un promedio entre estas dos mediciones para obtener el diámetro, que fue necesario para la fórmula de volumen.

También se procedió a medir la altura de las plantas. Con los datos del diámetro de la base del tallo y la altura de la planta, mediante la siguiente fórmula se calculó el volumen de las plantas.

$$Volumen = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * h$$

Luego las plantas se secaron en estufa y se hizo una fórmula de correlación lineal entre el volumen de la planta (cm³) y el peso (g) de la misma.

$$Peso = a * Volumen + b$$

El mismo procedimiento se realizó con las espigas. Se tomaron 12 espigas de cada híbrido (4 chicas, 4 medianas, y 4 de tamaño grande) y se midió el calibre de las mismas en la parte de mayor grosor. Posteriormente se pesaron, y con los datos del peso y volumen de cada espiga se realizó una fórmula de correlación para cada híbrido.

Con las fórmulas de correlación previamente obtenidas a partir de las plantas cortadas se calculó el volumen y peso de las plantas marcadas. De esta manera se obtuvo el peso promedio individual de cada planta y los datos se expresaron en biomasa ha⁻¹, considerando la densidad de plantas de cada tratamiento.

$$\frac{kgMS}{ha} = peso\ individual\ promedio * densidad$$

Para la medición de rendimientos y sus componentes se realizó una cosecha mecánica con una máquina experimental de dos surcos sobre una superficie de 5,25 m². En cada muestra se determinó el peso, la humedad de cosecha y el peso de 100 granos. Con el dato de rendimiento y peso individual de los granos se estimó el número de granos. Los resultados se expresaron con contenidos de humedad de los granos de 140 gr kg⁻¹.

También se realizó una caracterización climática de la localidad de General Villegas, con datos históricos y correspondientes a la campaña en estudio.

Diseño experimental y análisis estadístico:

Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas siendo la parcela principal la densidad, y las subparcelas una combinación factorial entre dosis de N y genotipo. El ensayo estaba compuesto por 4 bloques. Cada parcela estaba compuesta por 8 surcos de 11 metros de largo.

Para el análisis de índice de verdor y biomasa de plantas se utilizó el programa estadístico de Infostat, donde se realizó un análisis de la varianza y test de diferencias medias de tukey (p<0,05). En caso de interacción entre las variables estudiadas los datos se presentaron para cada híbrido.

Para el análisis de rendimiento se empleó un modelo de regresión lineal múltiple utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2019). Se empleó el módulo de modelos generales y mixtos utilizando como efectos fijos el nitrógeno y la densidad y como efecto aleatorio a los bloques particionado por híbrido. El modelo final utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = b_0 + b_1D_i + b_2N_i + b_3D_i^2 + b_4N_i^2 + b_i + e_{ij}$$

Debido a que la respuesta a densidad y nitrógeno fue curvilínea significativo se utilizó un modelo cuadrático para ambas variables ($p < 0,05$). En cada híbrido se determinó la combinación de densidad y dosis de N que permitió maximizar los rendimientos.

RESULTADOS

Caracterización climática

En la Figura 1 se presentan las condiciones climáticas durante la campaña 2019-2020. Se puede observar que las precipitaciones fueron muy escasas en el periodo de barbecho previo a la siembra del cultivo. Sin embargo, a partir de octubre comenzó

a aumentar la oferta hídrica y de esta manera se pudo lograr un adecuado desarrollo de los cultivos.

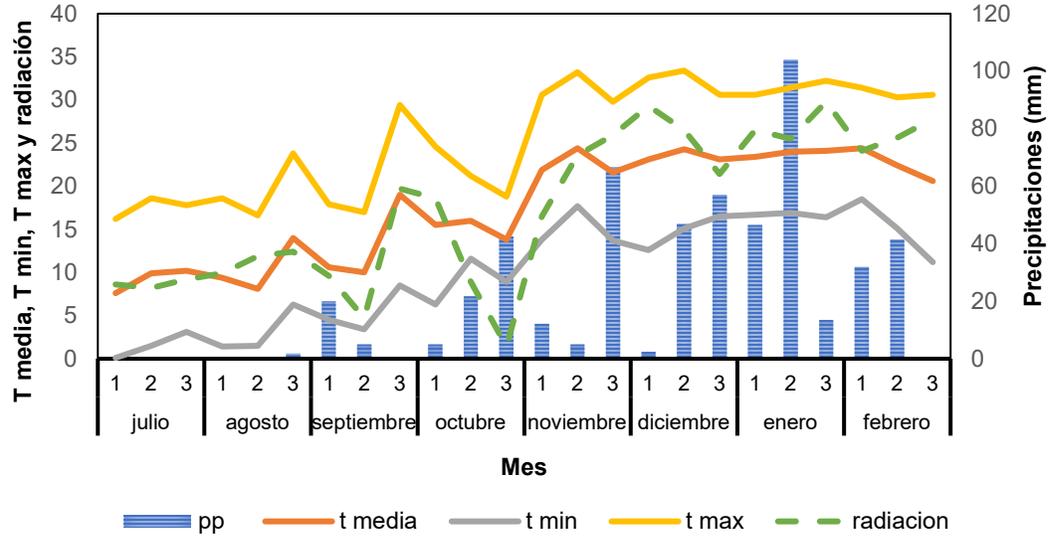


Figura 1. Temperatura media (t media), mínima (t min), máxima (t max), radiación global (radiación) y precipitaciones (pp) durante la campaña 2019-2020.

A continuación, en la Figura 2 se presentan las precipitaciones comprendidas entre octubre y febrero de la campaña en estudio y los valores históricos de la localidad de General Villegas. El periodo comprendido entre octubre y febrero acumuló 496 mm en la campaña 2019-2020, mientras que el promedio histórico para este periodo es de unos 475 mm, es decir, que las precipitaciones a lo largo de este trabajo fueron un 4% mayores a la media histórica. Durante las etapas iniciales del cultivo, se puede observar que las precipitaciones fueron levemente inferiores a la media histórica. Sin embargo, en el mes de diciembre las precipitaciones se nivelaron con la media histórica y en enero las superaron con un amplio margen.

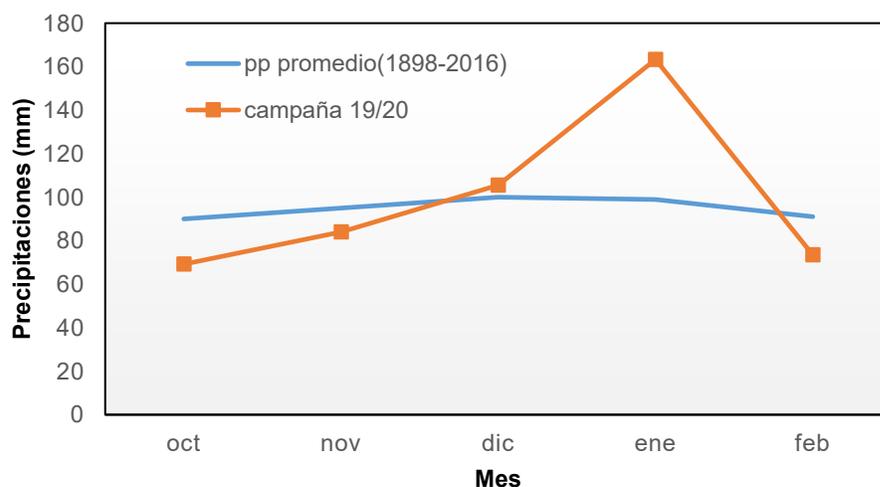


Figura 2. Precipitación media mensual histórica (pp promedio (1898-2016)) y de la campaña 2019/2020 de la localidad de Gral. Villegas en los meses de octubre-marzo.

Resulta muy importante analizar el periodo de ocurrencia de las precipitaciones, ya que un déficit hídrico en el periodo crítico del cultivo puede producir grandes mermas en el rendimiento. El número de granos por unidad de superficie queda determinado en el periodo cercano a floración (15 días antes y hasta 15-20 días posteriores a la floración) (Andrade et. Al. 1996). Para una fecha de siembra temprana, la floración ocurre a finales de diciembre. En este estudio se puede observar que las precipitaciones de diciembre-enero superaron a la media histórica, especialmente en enero. El periodo comprendido desde el 10 de diciembre hasta el 10 de enero (periodo crítico del cultivo), acumuló en total unos 150 mm de precipitaciones.

Índice de verdor de los cultivos en floración

El índice de verdor medido en las hojas correspondientes a la inserción de la espiga en R1 vario entre 37 y 63 unidades de spad, con un valor promedio de 49 (Tabla 1). Se observó una interacción triple ($p < 0,05$), entre los tratamientos evaluados por lo que a continuación se presenta la información para cada híbrido.

Tabla 1. Índice de verdor en hoja de la espiga de maíz según genotipo, densidad de siembra y dosis de nitrógeno (N).

Híbrido	Densidad	Dosis de N (kg ha ⁻¹)			
		0	60	120	240
ACA 473	50000	56	57	59	63
	80000	53	52	54	53
	110000	44	47	48	50
	160000	37	45	43	43
DK 7220	50000	54	56	59	57
	80000	45	47	50	52
	110000	42	49	45	48
	160000	39	42	43	42
AX 7761	50000	55	58	57	57
	80000	47	53	52	53
	110000	45	48	50	52
	160000	40	42	44	45

En los 3 híbridos se pudo observar que, a misma dosis de N, el índice de verdor aumentó a medida que la densidad disminuyó (Figura 3). Como era esperable, en las densidades más bajas cada planta tiene mayor cantidad de recursos a su disposición, y esto se vio reflejado en los valores obtenidos con el spad.

Al analizar en detalle el efecto de la dosis nitrogenada, no se logra observar un incremento significativo del índice de verdor a medida que aumenta la dosis de N, sobre todo en las densidades de siembra más bajas. En parte, esto se podría explicar por el alto nivel de N al momento de la siembra (128 kg N ha⁻¹). En relación con esto, las lecturas de spad no pueden predecir correctamente el exceso de N, ya que no todo el N es convertido en clorofila cuando la disponibilidad de este nutriente es elevada (Madonni, et al, 2003).

Similares resultados fueron obtenidos por Barraco & Diaz Zorita (2005), que observaron que con niveles de N suelo + N fertilizante mayores a 85 kg N ha⁻¹, no se logran aumentos significativos en el índice de verdor. El hecho de partir de un alto nivel de N al momento de la siembra, pudo haber contribuido a que no se hayan encontrado diferencias significativas en el valor de spad al variar las dosis de N. Las variaciones obtenidas se deben en mayor medida a los cambios en la densidad en los tres genotipos evaluados (Figura 3).

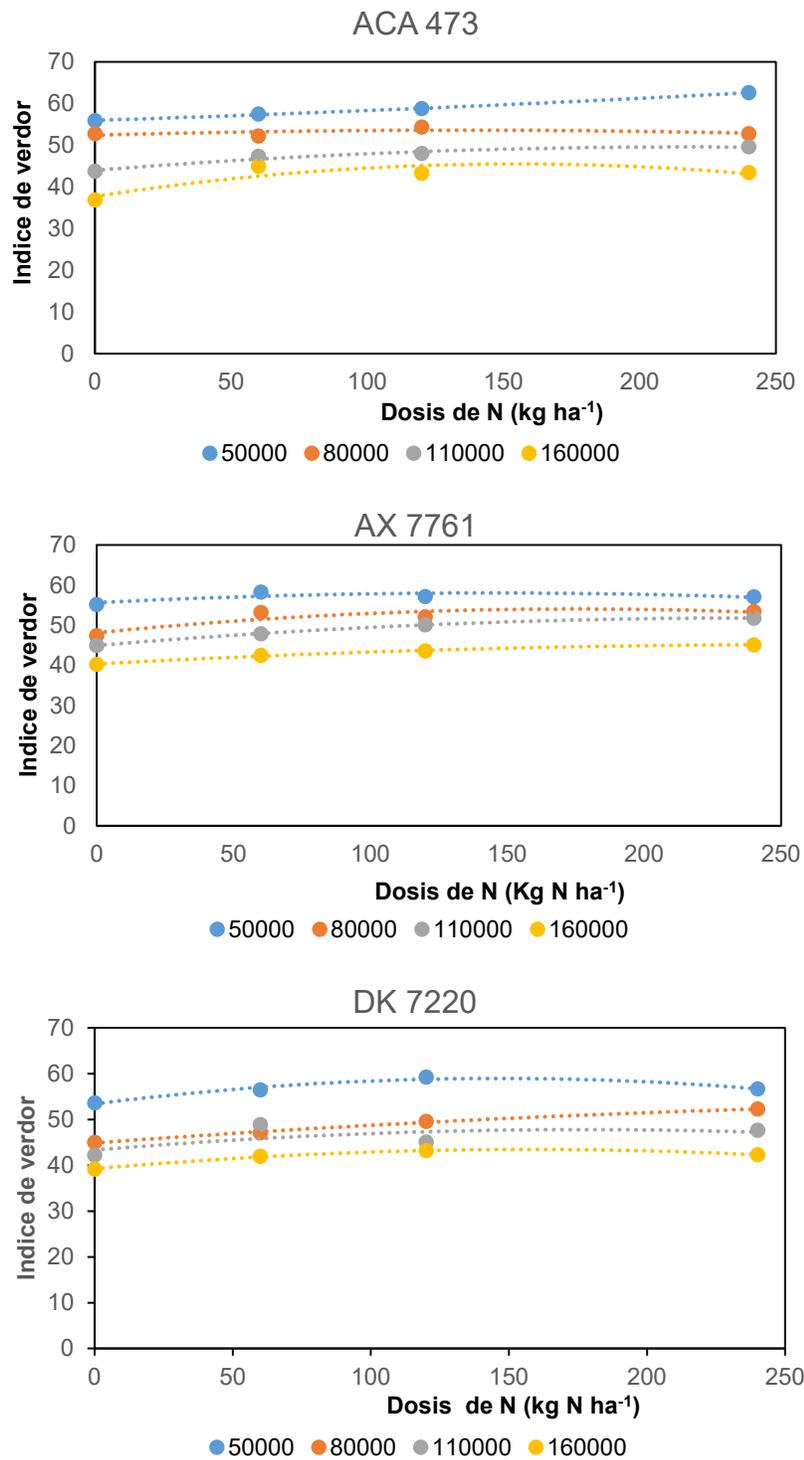


Figura 3. Índice de verdor (unidades de spad) según dosis de nitrógeno (N) y 4 densidades de siembra en tres genotipos de maíz.

BIOMASA

BIOMASA PLANTA⁻¹

En condiciones no limitantes de N, la biomasa por planta varió entre 113 y 296 gramos, con un valor promedio de 185 (Tabla 2). Al realizar el análisis estadístico se observó interacción entre el híbrido y la densidad ($p < 0,05$).

Tabla 2. Biomasa planta⁻¹ según genotipo y densidad de siembra en maíz en condiciones no limitantes de nitrógeno. *Letras diferentes indican diferencias ($p < 0,05$).

Hibrido	Densidad	Biomasa planta ⁻¹ (gr.)	Test tukey
ACA 473	50000	296	A
	80000	214	B
	110000	166	C
	160000	115	D
DK 7220	50000	293	A
	80000	229	B
	110000	154	C
	160000	119	C
AX 7761	50000	223	A
	80000	183	A
	110000	120	B
	160000	113	B

El híbrido que desarrolló una menor biomasa planta⁻¹ fue el AX 7761, especialmente en las densidades del rango entre 50000 y 110000 plantas ha⁻¹. Esto se debe a la característica fenotípica de este material que es de menor porte que otros de similar madurez fisiológica. No obstante, en la densidad más alta (160000 plantas ha⁻¹), la producción de biomasa fue similar a los otros genotipos.

Los híbridos ACA 473 y DK 7220 presentaron valores de biomasa muy similares entre sí a igual densidad de siembra (Tabla 2 y figura 4).

A nivel general, se puede observar el gran impacto que tiene la elección de la densidad de siembra sobre la producción de biomasa planta⁻¹. Al optar por densidades más bajas, cada planta tendrá mayor cantidad de recursos a su disposición, y su producción de biomasa tenderá a ser mayor (Figura 4).

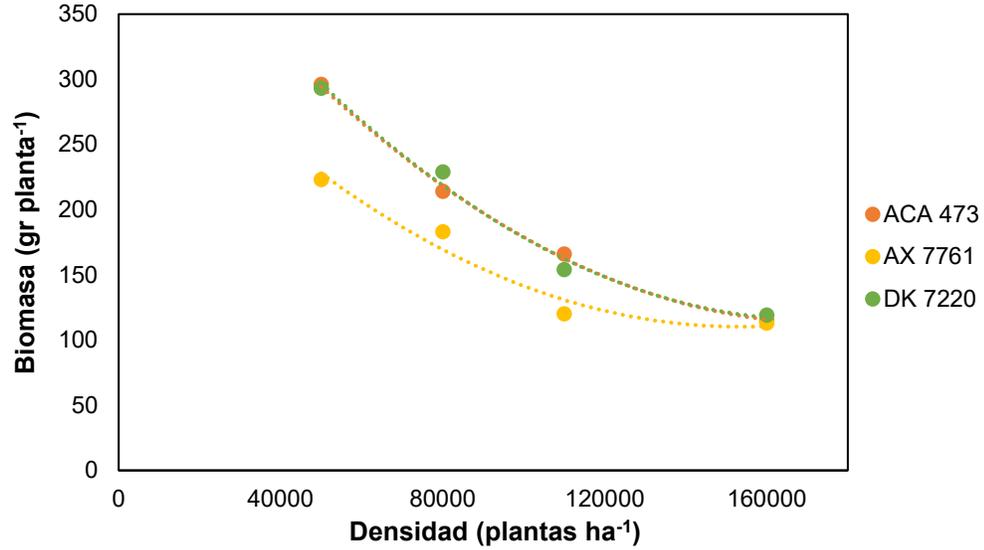


Figura 4. Biomasa por planta (gramos) según densidad de siembra en 3 genotipos de maíz.

BIOMASA HA.⁻¹

A partir de los datos obtenidos de biomasa planta⁻¹, se multiplicaron estos valores por la densidad lograda para obtener los datos de biomasa ha⁻¹.

En condiciones no limitantes de N, la biomasa varió entre 12281 y 18988 kg ha⁻¹, con un promedio de 16493 kg ha⁻¹. Al realizar el análisis estadístico, se observó una tendencia del efecto de la interacción híbrido/densidad ($p=0,13$). Sin embargo, hay efecto significativo de la variable densidad ($p<0,05$) y hay una tendencia del efecto del híbrido ($p=0,07$).

Tabla 3. Biomasa ha⁻¹ según genotipo y densidad de siembra de maíz.

Híbrido	Densidad	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Test tukey
ACA 473	50000	15594	A
	80000	16660	A
	110000	18988	A
	160000	17533	A
DK 7220	50000	14382	A
	80000	18110	A B
	110000	16417	A B
	160000	18158	B
AX 7761	50000	12281	A
	80000	14643	A B
	110000	16535	A B
	160000	18626	B

En la Figura 5 se observa que, con las densidades más bajas, el híbrido AX7761 acumulo menor biomasa que los otros híbridos. Sin embargo, con la densidad más alta, la biomasa lograda por hectárea fue similar a los otros genotipos. El incremento de biomasa ha^{-1} de este híbrido fue lineal en relación al aumento de la densidad de siembra ($r^2=0.97$). El híbrido DK 7220 presento un incremento en el valor de biomasa según un ajuste polinómico, estimándose la mayor biomasa disponible con una densidad de 127375 plantas ha^{-1} ($r^2=0,57$) (Figura 5).

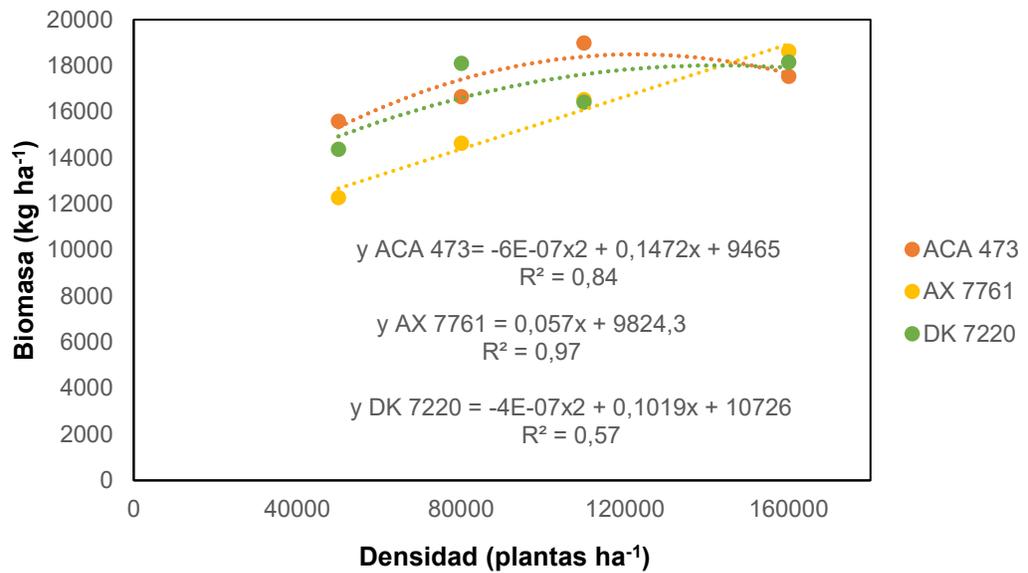


Figura 5. Producción de biomasa ha^{-1} según la densidad de siembra para 3 genotipos de maíz.

RENDIMIENTO

Los rendimientos medios de los cultivos variaron entre 9826 y 15729 kg ha⁻¹, con un valor promedio de 12504 kg ha⁻¹ (Tabla 4). Al realizar el análisis estadístico se detectó que hubo efecto significativo de la interacción triple, entre el híbrido, la densidad de siembra, y dosis de N ($p < 0,05$). Por otro lado, en los híbridos AX 7761 y DK 7220 hubo interacción entre la densidad de siembra y dosis de N.

Tabla 4. Rendimientos de maíz según genotipo, densidad de siembra y dosis de nitrógeno (N).

Hibrido	Dosis de N (kg ha ⁻¹)				
	Densidad	0	60	120	240
ACA 473	50000	10950	11674	12923	13815
	80000	10848	12828	14291	13886
	110000	11767	12685	14424	15729
	160000	11423	12336	12423	13812
DK 7220	50000	9826	11728	12777	13086
	80000	10095	11706	14179	14649
	110000	11207	11615	11627	14937
	160000	11664	12266	12478	15391
AX 7761	50000	9959	11468	12582	14338
	80000	9872	12090	13646	14184
	110000	10595	12654	13282	15267
	160000	10727	12285	11665	10522

ACA 473

En el híbrido ACA 473 no se observó interacción entre densidad de siembra y dosis de N ($p > 0,05$). Al analizar en forma independiente los tratamientos, se observó que a medida que se incrementó la dosis de N, el rendimiento aumentó significativamente, con respuestas polinómicas en todas las densidades (Figura 6). Las densidades intermedias fueron las más apropiadas para alcanzar los mayores rendimientos, ya que con las densidades de 50000 y 160000 plantas ha⁻¹ se obtuvieron menores rendimientos.

Se obtuvieron muy buenos rendimientos con la combinación de 120 kg N ha⁻¹ con 80000 y 110000 plantas ha⁻¹, sin embargo, la combinación que permitió maximizar los rendimientos fue con la densidad de 110000 plantas ha⁻¹ con la dosis de 240 kg N ha⁻¹ (Figura 7).

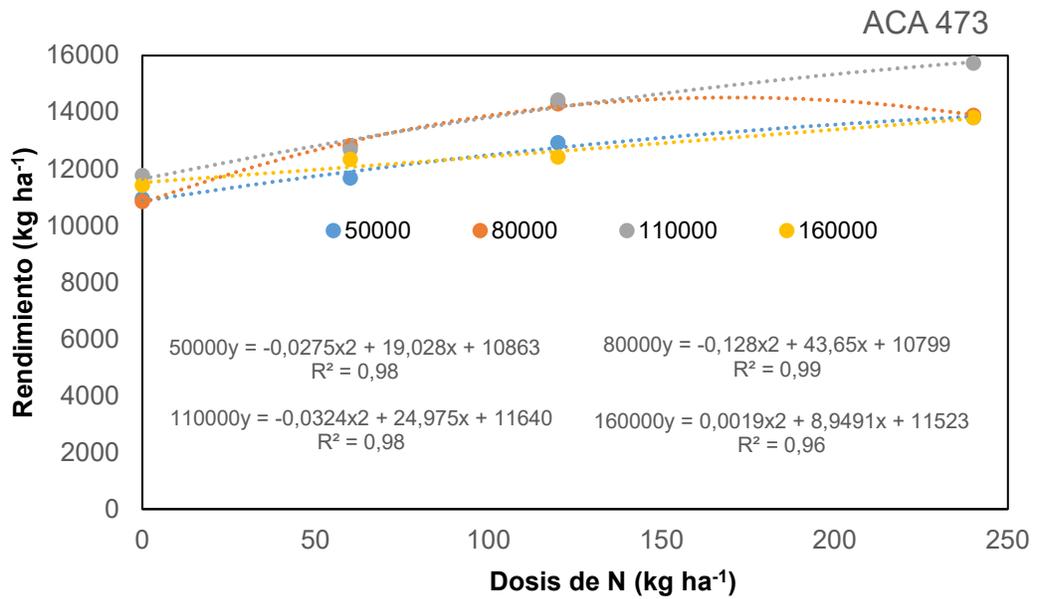


Figura 6. Rendimiento de Maíz ACA 473 según dosis de nitrógeno (N) y densidades de siembra.

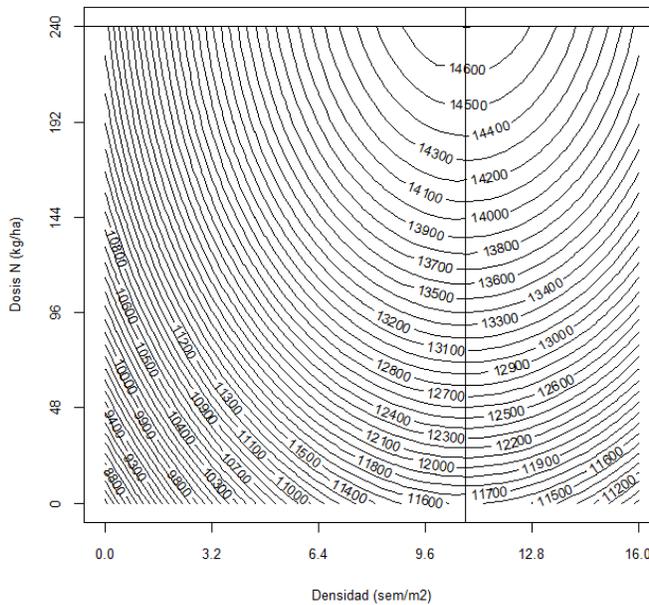


Figura 7. Interacción densidad x dosis de nitrógeno (N) del híbrido ACA 473. *El cruce de ambos ejes muestran la combinación de los tratamientos que maximiza el rendimiento del cultivo.

AX 7761

En el análisis estadístico del híbrido AX 7761, se detectó interacción entre la densidad y dosis de N ($p < 0,05$).

En la Figura 8 se observa que, a medida que aumentó la dosis de N, los rindes tendieron a incrementarse. Sin embargo, con la densidad de 160000 plantas ha^{-1} , los rendimientos tendieron a disminuir. Esto podría deberse a que el incremento en densidad y N, si bien permitió incrementar la producción de biomasa de este híbrido (Tabla 3), esto fue en detrimento del rendimiento.

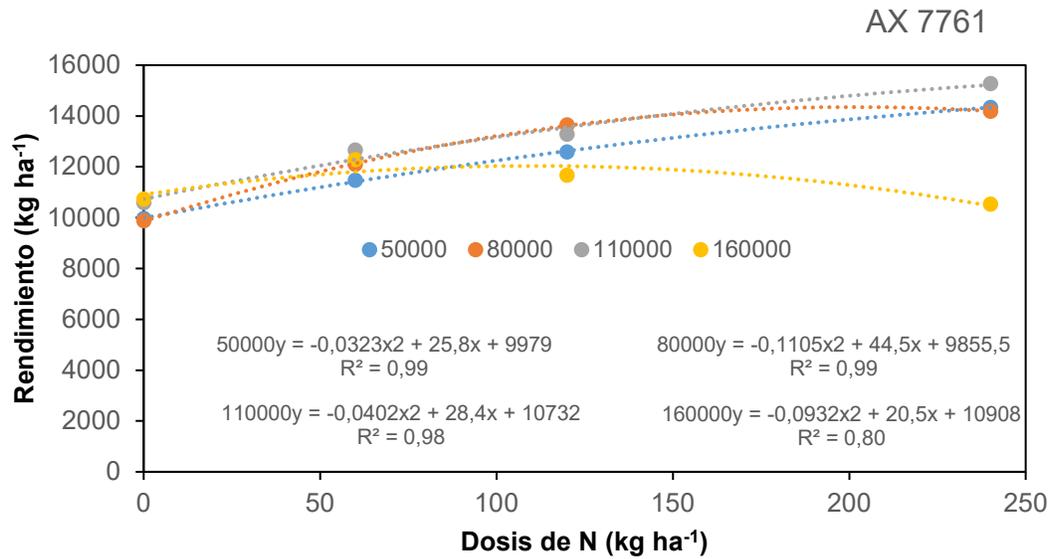


Figura 8. Rendimiento de maíz AX 7761 según dosis de nitrógeno (N) y densidades de siembra.

La combinación de estrategias de manejo que permitió optimizar rendimientos en este híbrido fue una densidad de 97000 plantas ha^{-1} , y una dosis nitrogenada de unos 215 kg de N ha^{-1} (Figura 9).

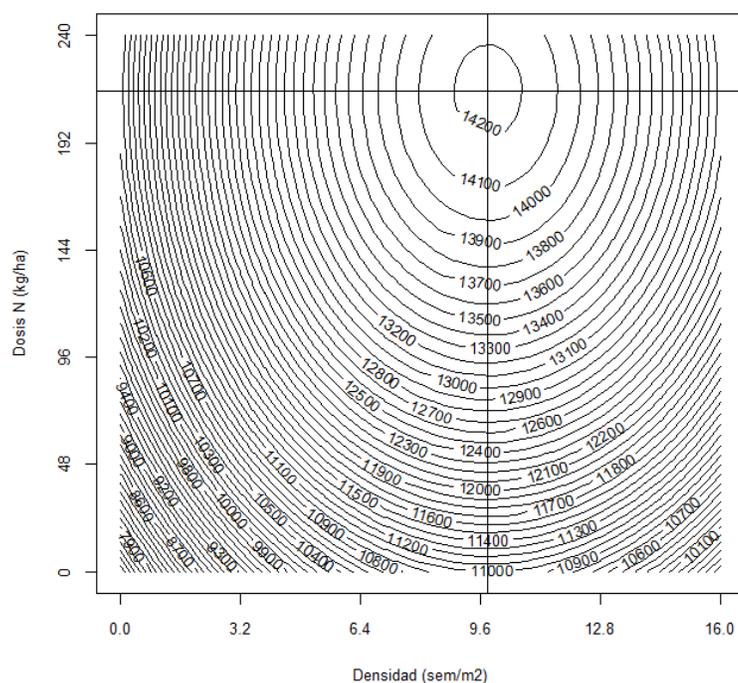


Figura 9. Interacción densidad x dosis de nitrógeno (N) del híbrido AX7761. El cruce de ambos ejes muestra la combinación de los tratamientos que maximiza el rendimiento del cultivo.

DK 7220

Al igual que en el híbrido AX 7761, el DK 7220 presentó interacción significativa ($p < 0,05$) entre las variables densidad y dosis de N.

Analizando las densidades de 110000 y 160000 plantas ha^{-1} , no se observan diferencias significativas en el rendimiento cuando la dosis de N varía entre 0 y 120 $kg\ ha^{-1}$, sin embargo, cuando se eleva la dosis a 240 $kg\ N\ ha^{-1}$ se puede observar un aumento significativo en el rendimiento. Otra situación diferente se observa con las densidades de 50000 y 80000 plantas ha^{-1} , con un umbral de 190 y 210 $kg\ N\ ha^{-1}$ respectivamente.

La combinación de 160000 plantas ha^{-1} con 240 $kg\ N\ ha^{-1}$ fue la que permitió obtener el rinde más alto en el híbrido DK 7220 (Figura 11).

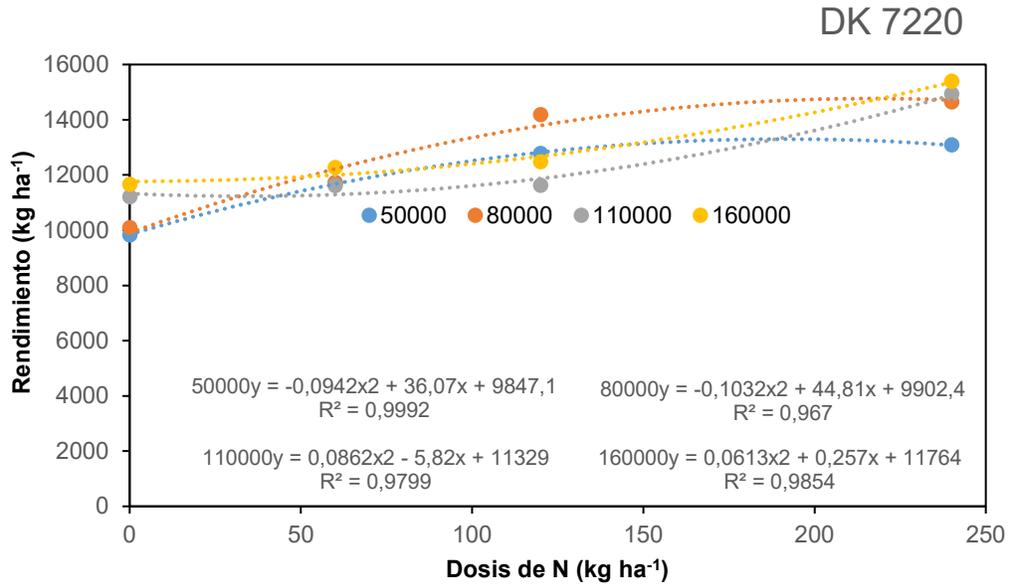


Figura 10. Rendimiento de maíz DK 7220 según dosis de nitrógeno (N) y densidades de siembra.

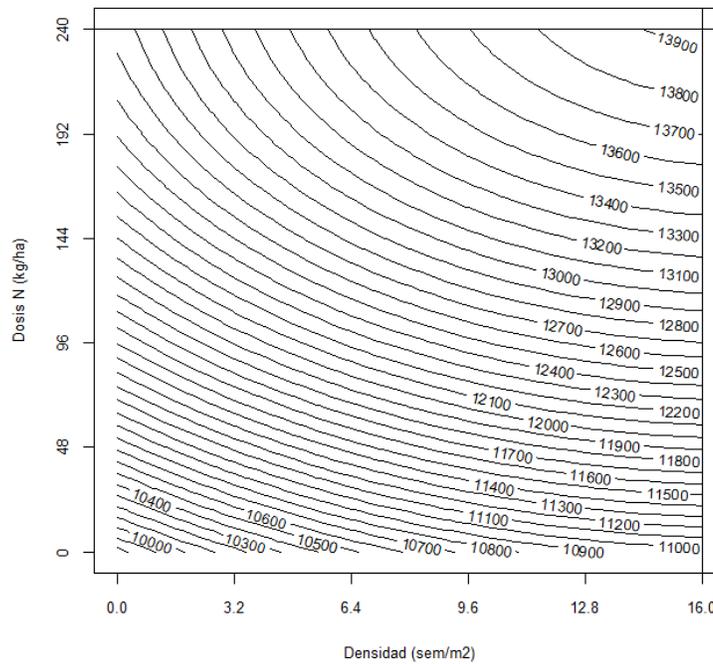


Figura 11. Interacción densidad x dosis de nitrógeno (N) del híbrido DK 7220. El cruce de ambos ejes muestra la combinación de los tratamientos que maximiza el rendimiento del cultivo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES:

Los resultados de este trabajo muestran que la elección del genotipo, densidad de siembra y dosis de N resulta en una tarea muy compleja y de gran importancia, ya que define el comportamiento del cultivo. No todos los híbridos tuvieron el mismo comportamiento ante los cambios de ajuste en las variables evaluadas.

El índice de verdor de la hoja de la espiga en floración se modificó en mayor medida por cambios en la densidad de siembra que en la dosis de N, con mayores valores para las densidades menores, indicando un mejor status nitrogenado por planta, independientemente del híbrido evaluado.

Ante condiciones no limitantes de N la biomasa lograda difirió entre genotipos y densidades de siembra. En cuanto al genotipo, fue menor en AX7761 y similar para los otros híbridos, mientras que con respecto a la densidad se observaron incrementos significativos para AX 7761 Y DK 7220.

En cuanto a rendimiento, bajo condiciones climáticas favorables, el uso de dosis mayores a 200 kg N ha⁻¹ permitió explotar los mayores rendimientos, aun en un sitio que presentaba adecuada disponibilidad de N al momento de la siembra.

En un trabajo de características similares realizado en 6 sitios diferentes cercanos a la localidad de Justiniano Posse, en el sudeste de Córdoba (Ruiz et al. 2018), se evaluaron diferentes densidades de siembra (entre 50000 y 130000 plantas ha⁻¹), y dosis de N (entre 0 y 240 kg N ha⁻¹). En los resultados enunciados, los máximos rendimientos en todos los sitios se obtuvieron con la mayor densidad evaluada (130000 plantas ha⁻¹) y la mayor dosis de N (240 kg N ha⁻¹), variando entre 13500 y 16300 kg ha⁻¹. Al comparar estos datos con los resultados obtenidos en este trabajo, se encuentran varias similitudes. En cuanto a la fertilización nitrogenada, en ambos trabajos se observa que los rendimientos se maximizaron con aplicaciones de N superiores a los 200 kg ha⁻¹. Con respecto a la densidad en este trabajo, los rendimientos se maximizaron con 110000 plantas ha⁻¹ en los híbridos ACA 473 y AX 7761, mientras que en el híbrido DK 7220, la densidad que permitió lograr el rendimiento más alto fue de 160000 plantas ha⁻¹. Esto sugiere que bajo condiciones hídricas favorables y con una alta provisión de N, planteos con altas densidades podrían permitir el logro de mayores rendimientos.

En otro trabajo realizado por Gustavo Ferraris en la EEA del INTA Pergamino (Ferraris, et al., 2020), se observó que las dosis más altas de fertilizante nitrogenado (220 kg N ha⁻¹) fueron las que permitieron lograr los mayores rendimientos. A diferencia de este trabajo, la densidad que obtuvo los mejores rindes fue la de 75000 plantas ha⁻¹. Al incrementar la densidad a 90000 plantas ha⁻¹ se vio una disminución en el rendimiento. Sin embargo, los rendimientos medios fueron menores (11116 kg ha⁻¹), dado que hubo una fuerte restricción hídrica inicial, según lo mencionado. Antecedentes previos muestran que, en condiciones de baja disponibilidad de recursos, la densidad de plantas óptima es sensiblemente menor (Andrade, et Al.1996).

Una característica observada en los 3 híbridos evaluados en este trabajo es que, con la dosis de 0 kg N ha⁻¹, las densidades más altas tuvieron mejores rendimientos promedio que las más bajas. Resultados diferentes fueron obtenidos por Miranda (2013), donde las densidades más bajas fueron las que lograron los mejores rendimientos en los tratamientos sin aportes de N. Se podría esperar que, ante una disminución en los recursos disponibles, en este caso N, los mejores resultados se obtengan con planteos de menor densidad. Sin embargo, en el actual trabajo, puede ser que la alta disponibilidad de N al momento de la siembra haya permitido a las densidades más altas tener cierta ventaja con respecto a las densidades más bajas en las etapas iniciales de desarrollo de los cultivos. El aumento de la densidad en el cultivo, al permitir una cobertura más temprana, redundara en una mayor producción final de biomasa e intercepción de la radiación. Resultados obtenidos por Andrade et al., (1996), demuestran que cultivos con bajas densidades aumentan el tiempo requerido para llegar al índice de área foliar crítico, dándose casos en que dicho valor no se alcanza. Puede haber sucedido que con las densidades más bajas y en las parcelas sin agregado de N como fertilizante, no se haya logrado llegar al IAF crítico, o se haya obtenido más tardíamente, penalizando el rendimiento del cultivo.

Con respecto a la densidad de siembra, se observaron diferencias significativas según el híbrido, coincidiendo con lo descrito por Gutiérrez (2017). Sin embargo, los 3 híbridos evaluados en este trabajo presentan una similitud, con la densidad más baja (50000 plantas ha⁻¹) se observó un descenso en los rendimientos. En los 3 híbridos fue la densidad que logro los menores rendimientos promedio. En años con buenas condiciones hídricas y en suelos sin limitaciones como el del presente estudio, no sería conveniente optar por bajas densidades ya que se estaría perdiendo potencial de rendimiento. Sin embargo, no deja de ser una buena alternativa en estrategias más defensivas, con menor disponibilidad hídrica y/o suelos más restrictivos. Por ejemplo, en un trabajo desarrollado por Girón et al. (2021) se observaron rendimientos similares con densidades de siembra entre 60000 y 100000 plantas ha⁻¹ en un ambiente de productividad media, limitado por una capa de tosca entre 1,6 y 2 m de profundidad.

En los híbridos ACA 473 y AX 7761 la densidad que permitió lograr los mayores rendimientos fue la de 110000 plantas ha⁻¹, mientras que en DK 7220 los máximos rindes se obtuvieron con 160000 plantas ha⁻¹ cuando la dosis de N fue de 240 kg N ha⁻¹. De esta manera, se podría concluir que la elección de densidades de siembra algo superiores a la media zonal, y una alta provisión de N aportaría un plus de rendimiento cuando las condiciones son favorables en suelos con buena aptitud agrícola. No obstante, estos resultados son de un sitio y campaña particular por lo que se requiere de mayores estudios para poder consolidar esta información.

BIBLIOGRAFÍA

Andrade, F.; Cirilo, A.; Uhart, S.; Otegui, M. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce (Bs As), La Barrosa, 1996, pág. 292.

Barraco, M. & Zorita M. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en Hapludoles Típicos. Revista Ciencia del suelo. 23(2): 197-203.

Bolsa de Comercio de Rosario, 2020.
<https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/produccion-y>

Bolsa de Comercio de Rosario, 2022
<https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/las-hectareas>

Borras L. & M. E. Otegui. 2001. Maize kernel weight response to postflowering source-sink ratio. Crop. Sci. 49:1816-1822.

CENSO NACIONAL AGROPECUARIO (2018).
https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/publicaciones/cna2018_resultados_preliminares_agricultura.pdf.

Cirilo, A.; Andrade, F.; Otegui, M.; Maddoni, G.; Vega, C.; Valentinuz, O. Ecofisiología del cultivo de maíz. En Eyherabide, G, H. (ed.) Bases para el manejo del cultivo de maíz. INTA, 2015, pág. 25-56.

Di Rienzo J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C.W. InfoStat versión 2019. Córdoba: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina URL
<http://www.infostat.com.ar>

Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H.R.; Barbieri, P.A. 2015. Maíz y Sorgo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos, Eds.: Echeverría, H. E.; García, F. Capítulo 15. 904 pp.

Eyherabide, G. Bases para el manejo del cultivo de maíz. INTA Pergamino, 2009, pág. 297.

Ferraris, G. N.; López, M.; Barberis, S., Mancuso, E.; Cuirolo, J. Estudio de la interacción entre cultivar, densidad y fertilización nitrogenada según fecha de siembra maíz. 2020.
https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_pergamino_estudio_de_la_interaccion_e

ntre cultivar densidad y fertilizacion nitrogenada segun fecha de siembra m
aiz camp 2019 20 0.pdf

FAO, 2019.

<http://www.fao.org/faostat/en/#data>

IPNI, 2016.

<http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>

Girón, P.; Barraco, M.; Miranda, W.; Scroffa, M.; Lista, J.; Courregues, B. 2020. Efecto de la densidad y la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de maíz. Memoria Técnica 2019-2020. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. 21-23.

Gutiérrez Parada, J. M. 2017. Interacción entre la fertilización nitrogenada y la densidad de siembra en dos híbridos de maíz sembrados en fechas tardías en el sudeste bonaerense (Tesis de grado). Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires, pág. 14.

Kruk, B. & Satorre, E. H. Densidad y arreglo especial del cultivo. En: Satorre, E.H. et al. (Eds). Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Universidad Nacional de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, 2003, Capítulo 13: pág. 276 – 316.

Madonni, G. A.; Ruiz R. A.; Vilariño, P.; Garcia de Salomone, I. Fertilización en los cultivos para grano. En Satorre, E. H. et al. (Eds). Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Universidad Nacional de Buenos Aires, Facultad de agronomía, 2003, Capitulo 19: pág. 501-557.

Miranda, W.; Barraco, M.; Justo, M.; Lardone, A. 2013. Resultados de ensayos de sorgo y maíz en Hapludoles Típicos de la campaña 2012-2013. Memoria Técnica 2012-13. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. Pp: 36-40.

Miranda, W.; Rampo, M.; Girón, P.; Barraco, M.; Lobos, M. 2017. Fecha de siembra, densidad y genotipo de maíz en el noroeste bonaerense: campañas 2014/2015, 2015/2016 y 2016/2017. Memoria Técnica 2016-2017. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. Pp: 36-42

Otegui, M.E.; López Pereyra M. Fecha de siembra. En Satorre, E.H. et al. (Eds). Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Universidad Nacional de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, 2003, Capítulo 12: pág. 259-275.

Pagani, A.; H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas y P.A. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 26(2): 183-193.

Ruiz, A.; Coyos, T.; Pagnan, L. 2018. Manejo de la fertilización nitrogenada y densidad de siembra de maíz en ambientes del sudeste de Córdoba – Experiencias de la chacra Justiniano Posse. *Maíz actualización 2018*. Informe de actualización técnica en línea nº 11.

Sarlangue, T., Andrade, F. H., Calviño, P. A., & Purcell, L. C. (2007) Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agronomy Journal*, 99(4), 984-991.

Salvagiotti, F.; Castellarin, J. M.; Ferraguti, F. J.; y Pedrol, H. M. (2011) Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Cienc. suelo [online]*. vol. 29, n.2 pp.199-212.

Uhart, S.A. y F.H. Andrade. 1995b. Nitrogen deficiency and maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Sci*. 35:1376-1383.

Wolfe, D W, D W Henderson, T C Hsiao, & A Alvino 1988 Interactive water and nitrogen effects on senescences of maize II Photosynthetic decline and longevity of individual leaves *Agronomy Journal*, 80: 865-870.