Eficiencia y Precisión en la Fertilización del Girasol:

Resultados del Ensayo de Dosis Variable en Reconquista, Santa Fe

Reconquista, Santa Fe · Campaña 2025/26

Autor: Dr. (Ing. Agr.) Gonzalo Scarpin

---

1. Introducción

El nitrógeno (N) constituye el nutriente limitante más relevante para los cultivos extensivos de la región pampeana argentina. En girasol (*Helianthus annuus* L.), su deficiencia durante los estadios vegetativos críticos puede reducir significativamente el número de granos por capítulo y el peso de los mismos, comprometiendo tanto el rendimiento final como la calidad del aceite.

Históricamente, la fertilización nitrogenada se ha realizado mediante **dosis fijas**, que ignoran la variabilidad espacial natural de los lotes agrícolas. Esta práctica conduce frecuentemente a la sub-fertilización de zonas con alto potencial productivo y a la sobre-fertilización de sectores con limitaciones edáficas o hídricas, reduciendo la eficiencia global del sistema.

La **agricultura de precisión** (AP) propone ajustar la dosis de N a la variabilidad espacial intra-lote, utilizando como insumo los índices de vegetación derivados de teledetección como indicadores del estado nutricional del cultivo al momento de la fertilización. Esta estrategia permite reducir aplicaciones en zonas con alta dotación natural de N e incrementarlas donde el suelo es deficiente, optimizando el retorno económico y reduciendo el impacto ambiental.

Objetivo: Evaluar el efecto de distintas estrategias de fertilización nitrogenada —dosis fija vs. dosis variable basada en índices espectrales—, con y sin la adición de boro, sobre los componentes del rendimiento, la calidad y la rentabilidad del girasol en condiciones de producción del norte de Santa Fe.

Hipótesis de trabajo: la prescripción de dosis variable de N, guiada por índices de vegetación, permite igualar el rendimiento de la dosis fija utilizando menor cantidad total de fertilizante, mejorando la eficiencia de uso del N (EUN) y la rentabilidad neta parcial.

2. Materiales y Métodos

2.1 Sitio experimental

El ensayo se llevó a cabo durante la campaña agrícola 2025/26 en la localidad de Reconquista, provincia de Santa Fe (Argentina). En la Tabla 1 se detallan las características edáficas y agronómicas iniciales del sitio de experimentación.

Tabla 1. Resumen de la información referida al sitio de experimentación.

Parámetro	Valor
Localidad	Reconquista, Santa Fe
Establecimiento	INTA Reconquista
Coordenadas	–29.266° S, –59.744° O
Tipo de suelo	Argiudol típico
N mineral inicial (0–20 cm)	65 kg N ha^{-1}

Materia orgánica	1.47%
Cultivo antecesor	Trigo
Campaña	2024/2025

2.2 Manejo del cultivo

La siembra del experimento se realizó el 01/10/2025, utilizando el híbrido BRV 4225 CL, con un distanciamiento entre surcos de 0,52 cm y una densidad objetivo de 35.000 pl ha^{-1}. Cabe destacar que esta fecha de siembra es considerada tardía para la región evaluada. Durante el ciclo del cultivo, se realizaron vuelos con un vehículo aéreo no tripulado (VANT o Dron) DJI Mavic 3M, equipado con sensores RGB y multiespectral, con el fin de monitorear el desarrollo del canopeo y registrar la variabilidad espacial del lote.

2.3 Diseño experimental y tratamientos

El ensayo se condujo bajo un Diseño en Bloques Completos al Azar (DBCA) con 8 tratamientos y 4 repeticiones, totalizando 32 unidades experimentales. El bloqueo espacial se implementó de forma estratégica para mitigar e independizar la heterogeneidad natural del lote de los efectos de los tratamientos.

Para la elaboración de las prescripciones de Dosis Variable (AP), se utilizaron las imágenes recabadas por la cámara multiespectral durante el vuelo realizado el 05/11/2024, momento en el cual el cultivo transitaba el estadio fenológico V8. A partir de la combinación de las bandas verde, roja, infrarroja cercana e infrarroja, se generaron los índices espectrales NDVI, NDRE y GNDVI. La fertilización nitrogenada al voleo se efectuó ese mismo día.

El cálculo de las dosis variables se basó en el algoritmo empírico de Holland y Schepers. Para ello, se calculó el "índice de suficiencia" utilizando el valor promedio del índice espectral de cada parcela frente a una referencia virtual, definida por el percentil 95 de la distribución del índice dentro de cada bloque.

Por otro lado, la fertilización foliar con boro se llevó a cabo utilizando el producto comercial SEACTIV GOLD BMO (Timac Agro) a una dosis de 1 litro ha^{-1}. Esta aplicación se realizó el 17/11/2024, coincidiendo con el estadio fenológico R1 (inicio de floración).

Las parcelas fueron cosechadas de manera mecánica, ajustando los rendimientos a una humedad comercial de recibo del 11%. En la Tabla 2 se detallan los tratamientos evaluados.

Tabla 2. Descripción detallada de los tratamientos aplicados en el experimento.

N°	Código	Descripción	Dosis N prom. (kg ha^{-1})
1	control	Sin fertilización nitrogenada ni boro	0
2	Boro	Boro foliar (sin N)	0
3	N 80	Urea a tasa fija — 80 kg N ha^{-1}	80
4	N_80_B	Urea a tasa fija (80 kg N ha^{-1}) + boro foliar	80
5	N_V_NDVI	Dosis variable prescripta por NDVI	~29 Rango (27 a 30)
6	N_V_NDRE	Dosis variable prescripta por NDRE	~84 Rango (81 a 86)
7	N_V_GNDVI	Dosis variable prescripta por GNDVI	~38 Rango (37 a 39)
8	N_B_V_GNDV	Dosis variable GNDVI + boro foliar	~37 Rango (31 a 39)

2.4 Variables medidas

Para evaluar el desempeño productivo, la eficiencia técnica y la calidad industrial de cada estrategia, se determinaron las siguientes variables:

- **Rendimiento ajustado (kg ha^{-1}):** Se determinó mediante la cosecha mecánica de las unidades experimentales. El peso de grano obtenido en cada parcela se estandarizó ajustándolo a la humedad comercial de recibo del 11%.
- **Componentes del rendimiento:**
  - **Número de granos por capítulo (NG cap^{-1}):** Calculado de forma indirecta a partir del rendimiento de la parcela, la densidad de plantas y el peso individual de los granos.
  - **Peso de mil granos (P1000, g):** Se determinó mediante el conteo y pesaje de submuestras de granos limpios y secos de cada unidad experimental.
- **Calidad industrial (Acidez %):** Se determinó el porcentaje de acidez libre en el aceite extraído, funcionando como un indicador de la estabilidad y calidad del producto final.
- **Eficiencia de Uso del Nitrógeno (EUN, kg grano kg N^{-1}):** Se calculó la **Eficiencia Agronómica**, que cuantifica el incremento de rendimiento por cada unidad de fertilizante nitrogenado añadido, por encima de la producción natural del suelo. A diferencia de la productividad parcial, este cálculo descuenta el aporte del suelo (testigo) para aislar el efecto real del insumo

2.5 Análisis estadístico

Para cada variable respuesta se ajustó un modelo lineal mixto con estimación REML, de la forma:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + B_j + \varepsilon_{ij}$$

donde τ_i es el efecto fijo del tratamiento (i = 1, …, 8), B_j es el efecto aleatorio del bloque ($B_j \sim N(0, \sigma^{2B})$), y $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ es el error residual.

La significancia del efecto tratamiento se evaluó mediante **ANOVA tipo III** (función *Anova()*, paquete *car*). Las comparaciones múltiples entre medias se realizaron con la prueba de **Tukey HSD** (α = 0,05) aplicada sobre medias marginales estimadas (*emmeans*). El ajuste del modelo fue validado mediante pruebas de autocorrelación residual, normalidad de residuos y convergencia del algoritmo de maximización. Todos los análisis se realizaron en **R (v4.4+)**.

3. Resultados

3.1 Estadística descriptiva

En la Tabla 3 se presentan las medias y la variabilidad de las principales variables por tratamiento, ordenados de mayor a menor rendimiento medio.

A partir de estos datos, se evidencia una clara respuesta del cultivo a la fertilización. Los tratamientos sin aporte de nitrógeno (Control y Boro exclusivo) establecieron el rendimiento base del ambiente, promediando los 1.242 kg ha^{-1}. En contraste, todas las estrategias que incluyeron nitrógeno, ya sea en dosis fijas o variables, lograron elevar los rendimientos por encima de los 1.660 kg ha^{-1}.

El rendimiento máximo absoluto se obtuvo con la estrategia de dosis fija de 80 kg N ha^{-1} acompañada con boro (N_80_B), alcanzando los 1.784 kg ha^{-1}. Este valor fue estrechamente seguido por la prescripción de dosis variable basada en el índice NDRE (1.765 kg ha^{-1}), la cual demandó una cantidad de fertilizante promedio muy similar (84,1 kg N ha^{-1}). La aplicación exclusiva de boro sin nitrógeno no reportó beneficios productivos, ubicándose en el estrato inferior de rendimiento.

Sin embargo, el hallazgo más sobresaliente del ensayo radica en la eficiencia en el uso de los insumos. Estrategias de dosis variable, como las guiadas por los índices GNDVI y NDVI, lograron rendimientos sumamente competitivos (1.761 y 1.662 kg ha^{-1}, respectivamente) utilizando menos de la mitad del fertilizante que los tratamientos de dosis fija (38,2 y 28,6 kg N ha^{-1} frente a 80 kg N ha^{-1}). Esto se refleja directamente en la EUN: mientras que las dosis fijas produjeron entre 5,8 y 6,6 kg de grano por cada kg

de nitrógeno aplicado, los algoritmos variables (GNDVI y NDVI) duplicaron y hasta triplicaron esa eficiencia, alcanzando picos de 13,6 y 15,8 kg kg N^{-1}.

En cuanto a los componentes del rendimiento, el peso de 1000 granos (P1000) osciló entre 48,0 y 52,6 g. Se observó una tendencia a lograr granos levemente más pesados en aquellos tratamientos que combinaron nitrógeno con boro (N_80_B y N_B_V_GNDV) o que aplicaron altas dosis de N (N_V_NDRE). Finalmente, la variabilidad interna de los tratamientos, expresada a través del Coeficiente de Variación (CV), se mantuvo mayoritariamente en un rango agronómicamente aceptable (10-14%), lo que otorga solidez y confiabilidad a las medias reportadas.

El efecto del tratamiento sobre el rendimiento fue significativo en el ANOVA tipo III aplicado al modelo mixto (7 gl; $p < 0,001$). Este resultado confirma que al menos dos tratamientos difieren significativamente en su rendimiento, validando la pertinencia del diseño experimental y la magnitud de las respuestas observadas (Tabla 3).

El modelo mixto presentó ajuste adecuado (R^2 condicional = 0,625; R^2 marginal = 0,546; ICC = 0,174; σ = 184,8 kg ha^{-1}), y los diagnósticos de residuos no revelaron problemas de autocorrelación (p = 0,188 en prueba de Durbin-Watson) ni convergencia del algoritmo REML.

Tabla 3. Estadística descriptiva por tratamiento. CV: coeficiente de variación; Ac: acidez del aceite; EUN: eficiencia de uso del nitrógeno; P1000: peso de mil granos. Letras distintas en la columna 'Grupo Tukey' indican diferencias significativas (α = 0,05) en el rendimiento.

Tratamiento	Estrategia	Dosis N (kg ha^{-1})	Rto 11% (kg ha^{-1})	DE (kg ha^{-1})	CV (%)	EUN (kg kg N^{-1})	P1000 (g)	Grupo Tukey Rto 11%
N_80_B	Dosis Fija	80,0	1.784	219	12,3	6,6	52,4	a
N_V_NDRE	D. Variable	84,1	1.765	183	10,3	6,7	52,3	a
N_V_GNDVI	D. Variable	38,2	1.761	252	14,3	13,6	48,0	a
N_80	Dosis Fija	80,0	1.717	224	13,0	5,8	50,3	a
N_B_V_GNDV	D. Variable	36,8	1.694	234	13,8	11,9	52,6	ab
N_V_NDVI	D. Variable	28,6	1.662	14	0,8	15,8	50,3	abc
control	Control	0,0	1.254	128	10,2	—	49,5	bc
Boro	Control	0,0	1.230	247	20,1	—	48,0	c

Por otro lado, la Tabla 4 resume los resultados del ANOVA tipo III para cada variable de respuesta agronómica. Ademas de rendimiento, las variables de EUN, granos por capítulo y acidez del aceite presentaron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados.

Tabla 4. ANOVA tipo III (modelo mixto DBCA): efecto del tratamiento sobre variables agronómicas clave. Código de significancia: *** p < 0,001; ** p < 0,01; * p < 0,05; ns = no significativo.

Variable respuesta	χ^2	gl	p-valor	Significancia
Rendimiento ajustado 11% (kg ha^{-1})	42,15	7	$4,87 \times 10^{-7}$	***
EUN (kg grano kg N^{-1})	111,87	7	$3,76 \times 10^{-21}$	***
Granos por capítulo	33,01	7	$2,64 \times 10^{-5}$	***
Acidez del aceite (%)	17,01	7	$1,73 \times 10^{-2}$	*
Peso de 1000 granos (g)	12,12	7	$9,67 \times 10^{-2}$	.
Densidad de plantas (pl ha^{-1})	10,04	7	$1,86 \times 10^{-1}$	ns

4. Comentarios finales

Respuesta al nitrógeno

El cultivo respondió positivamente a la fertilización nitrogenada en todos los tratamientos con N, con incrementos de rendimiento de entre **~400 y ~550 kg ha^{-1}** sobre el testigo sin fertilizar. Estos incrementos confirman la existencia de una limitación real de N en el lote, consistente con los valores de N mineral inicial (65 kg N ha^{-1}) y el nivel de materia orgánica (1,47%) relevados en el sitio.

Dosis variable vs. dosis fija

Los tratamientos de AP guiados por **NDRE** y **GNDVI** alcanzaron rendimientos estadísticamente comparables a la dosis fija de 80 kg N ha^{-1} (grupo Tukey 'a'), utilizando dosis promedio considerablemente menores (~35–84 kg N ha^{-1} vs. 80 kg N ha^{-1} fijos). Esto se traduce en incrementos sustanciales de la **EUN**: los tratamientos GNDVI y NDVI registraron EUN de 13,6 y 15,8 kg grano kg N^{-1}, respectivamente, frente a 5,8–6,7 kg grano kg N^{-1} de las dosis fijas. Esta mayor eficiencia es relevante tanto por su impacto ambiental (menor riesgo de pérdidas de N por lixiviación o desnitrificación) como por su ventaja económica en contextos de costo elevado de insumos.

Respuesta al boro

La aplicación aislada de boro foliar (tratamiento *Boro*), sin el acompañamiento de N, no generó diferencias estadísticamente significativas en rendimiento respecto al testigo absoluto (grupo Tukey 'c'). Este resultado sugiere que, en las condiciones de este ambiente particular, el **N fue el factor limitante dominante** por sobre el boro, relegando el efecto de este micronutriente a un rol secundario o nulo.

Calidad del aceite

Se detectó un efecto significativo del tratamiento sobre la acidez del aceite (p = 0,017), aunque las diferencias entre medias son de escasa magnitud agronómica (rango 47,6–50,7%). Ningún tratamiento comprometió la calidad industrial del grano en forma relevante.

Limitaciones

Si bien los resultados obtenidos demuestran el potencial de la dosis variable para optimizar la eficiencia del uso de los insumos, las siguientes limitantes deben ser tenidas en cuenta al momento de interpretar y extrapolar las conclusiones:

- Especificidad del escenario agronómico: El presente ensayo se desarrolló durante una única campaña agrícola y en una sola localidad. Además, se evaluó un único genotipo (el híbrido BRV 4225 CL) implantado en una fecha de siembra tardía para la región. Dado que la respuesta a la fertilización nitrogenada en girasol presenta una fuerte interacción genotipo-ambiente (fuertemente condicionada por la disponibilidad hídrica, la radiación incidente, la temperatura y el nitrógeno mineral inicial), los umbrales productivos y de eficiencia aquí reportados son específicos para estas condiciones particulares.

- Potencia estadística: Aunque el diseño en bloques permitió aislar eficientemente la variabilidad espacial del lote, el tamaño de la muestra (n = 4 repeticiones por tratamiento) impone ciertas restricciones sobre la potencia estadística del ensayo. Esto limita, en algunos casos, la capacidad de detectar diferencias significativas finas en las comparaciones múltiples entre estrategias con rendimientos muy cercanos.

- Necesidad de validación regional: Para consolidar las curvas de respuesta y ajustar los algoritmos de recomendación satelital o multiespectral, estos resultados deben considerarse como una valiosa base preliminar. Resulta indispensable dar continuidad a esta línea de trabajo a través de ensayos multi-ambiente y multi-año, incorporando un abanico más amplio de fechas de siembra y materiales genéticos, antes de derivar recomendaciones generalizables a escala comercial para todo el norte de Santa Fe.