

Evaluación de productos y estrategias de fertilización nitrogenada en trigo

Proyecto ALZ – Agroinnova

Campaña 2025-2026

Informe de resultados

Introducción

Se llevó a cabo un ensayo en el Campo Experimental de América Agroinnova (América, Buenos Aires), en colaboración con la empresa ALZ, con el objetivo de evaluar el efecto de distintas estrategias de nutrición y del uso de productos provistos por la empresa sobre el desempeño del cultivo de trigo. El análisis se orientó a cuantificar cambios en la captura de recursos y en variables ecofisiológicas asociadas a la generación de la productividad en grano del cultivo, así como su expresión final en el rendimiento y sus componentes.

Los objetivos específicos fueron: (i) evaluar alternativas de re-fertilización sobre una base de fertilización típica zonal; y (ii) determinar si la aplicación de distintos productos provistos por ALZ aporta efectos adicionales respecto de la estrategia nutricional convencional. Un objetivo adicional fue educar a estudiantes de grado residentes en Agroinnova en la manera de llevar a cabo un experimento a campo en una colaboración entre investigadores de universidades, productores agropecuarios y representantes de empresas desarrolladoras de insumos para el agro.

Materiales y Métodos

- Descripción general:

El ensayo se sembró en un lote franco arenoso, en posición de loma, con 68% de arena y 1,66% de materia orgánica en el horizonte superficial. La fecha de siembra fue el 3 de junio de 2025, realizada con una sembradora de grano fino con surcos distanciados a 17,5 cm. Cada parcela tuvo un ancho de 6 surcos con 7 metros de largo. Todos los tratamientos se sembraron con la variedad DM Araucaria con la misma densidad. Al momento de la siembra, el suelo presentaba 65 kg/ha de N en forma de nitratos y 18 ppm de fósforo extractable Bray 1. Ajustándose a la práctica típica en la zona para ambientes similares a aquel en el que se llevó a cabo el proyecto, todo el ensayo se fertilizó a la siembra con 100 kg/ha de MAP (N11 – P52 - K0) y durante la etapa de aparición de hojas (4 de julio) se aplicó una dosis de 200 kg/ha de urea al voleo.

- Tratamientos y diseño experimental:

El diseño experimental se acordó luego de intercambios entre el equipo directivo de América Agroinnova, el Dr. Martín Díaz-Zorita (UNLPam) y el equipo de ALZ. El ensayo consistió en la evaluación de cinco tratamientos (T1–T5) que combinaron una fertilización nitrogenada de base y distintas estrategias de re-fertilización y/o aplicación de productos fitoestimulantes provistos

por la empresa ALZ. Los tratamientos fueron: T1) control con 200 kg/ha de urea durante la aparición de hojas pre-macollaje; T2) T1 + 4 L ha⁻¹ de Smartfoil + 3 kg/ha de sulfato de amonio en pleno macollaje; T3) T1 + 70 kg/ha de urea en inicios de encañazón; T4) T3 + 2 L ha⁻¹ de Smartfoil en inicios de encañazón; y T5) T3 + 250 cc ha⁻¹ de Evolutio en hoja bandera. Así, el contraste entre T1, T2 y T3 permitiría evaluar el impacto directo de una refertilización nitrogenada en encañazón y su posible reemplazo por la mezcla de Smartfoil + Sulfato de amonio, mientras que los efectos de T4 y T5 respecto de T3 permitirían evaluar el efecto de Smartfoil y Evolutio como fitoestimulantes. El diseño experimental fue en bloques completos al azar, con los tratamientos aleatorizados dentro de cada bloque y un total de cuatro repeticiones por tratamiento (bloques). En la Tabla 1 se detallan los tratamientos realizados.

Tabla 1. Tratamientos evaluados incluyendo productos, dosis y estadios fenológicos de aplicación (estados Z según escala de Zadoks).

TRATAMIENTO	Fertilización nitrogenada inicial	Re-fertilización nitrogenada	Aplicación de fitoestimulantes
T1	Urea 200 kg/ha voleados Z1.3	-	
T2	Urea 200 kg/ha voleados Z1.3	-	Smartfoil 4 l/ha + sulfato de amonio 3 kg/ha Z2.5
T3	Urea 200 kg/ha voleados Z1.3	Urea 70 kg/ha voleados Z3.1	
T4	Urea 200 kg/ha voleados Z1.3	Urea 70 kg/ha voleados Z3.1	Smartfoil 2 l/ha Z 3.1
T5	Urea 200 kg/ha voleados Z1.3	Urea 70 kg/ha voleados Z3.1	Evolutio 250 cc/ha Z4.9

- Mediciones y estimaciones:

Se registró la fenología en visitas semanales desde la emergencia del cultivo. A partir del inicio de la encañazón (septiembre) y hasta el fin del llenado de los granos, se estimó cada diez días la intercepción de radiación de cada parcela utilizando un GreenSeeker que integra en el área del cultivo el valor de índice verde normalizado (NDVI). Los valores de NDVI obtenidos se transformaron a la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (fPAR) mediante la ecuación propuesta por Pellegrini et al. (2020). A partir de la serie temporal de fPAR, se estimó el área bajo la curva (AUC) para cada parcela como un indicador integrador de la eficiencia de intercepción de la radiación a lo largo del ciclo del cultivo.

Luego de la madurez fisiológica, se cosecharon todas las plantas de 3 metros lineales de los 3 surcos centrales de cada parcela (1,575 m²). Se pesó la biomasa completa y se estimó la biomasa seca total considerando un contenido de humedad del 5% sobre el peso total de la muestra inicial. Cada muestra se trilló en trilladora estacionaria, la biomasa total de granos cosechados se pesó y se cuantificó la humedad para estimar el rendimiento en grano. El índice de cosecha se obtuvo a partir de la división entre el rendimiento (0% HR) y la biomasa (0% HR). De cada muestra se tomó una alícuota de 200 granos y se pesó para estimar el peso medio del grano. El número de granos por metro cuadrado (NG/m²) se estimó dividiendo el rendimiento por el peso medio del grano.

- Análisis de datos:

Para evaluar el impacto de los tratamientos sobre la captura de radiación se comparó la fPAR a lo largo de todo el ciclo considerando los valores medidos en función del día de la emergencia. Se realizó un análisis de la varianza para estimar el efecto de los tratamientos sobre la biomasa, índice de cosecha, el NG/m², el peso unitario del grano, el rendimiento y el AUC mediante modelos mixtos, considerando como factor fijo al tratamiento y como factor aleatorio al bloque. Las medias se compararon mediante el método LSD Fisher ($\alpha = 0,05$). Se realizaron regresiones entre el rendimiento y sus componentes numéricos y entre ambos componentes numéricos entre sí para evaluar posibles efectos cualitativos de alguna condición del cultivo sobre las relaciones esperables según la bibliografía.

Resultados

El cultivo emergió el 15 de junio de 2025, sin observarse diferencias entre tratamientos en la fecha de emergencia. Las densidades logradas no tuvieron diferencia significativa entre tratamiento ($p=0,6035$), con valores medios de 329, 324, 381, 341 y 421 plantas/m² para los tratamientos T1, T2, T3, T4 y T5 respectivamente. La campaña se caracterizó por un invierno húmedo, con aproximadamente 100 mm acumulados entre junio y agosto, seguido por un período con precipitaciones por debajo del promedio histórico entre septiembre y noviembre, con un total acumulado de 167 mm en ese trimestre. No se registraron eventos de heladas atípicos para la región, con la excepción de una helada agronómica ocurrida el 27 de octubre, en la que se midieron 3 °C en cabina meteorológica. Sin embargo, no se observaron daños en el cultivo atribuibles a dicho evento. Las condiciones durante el llenado de grano fueron las típicas para la región.

i) Estimación y comparación de la eficiencia de intercepción de la radiación

La evolución de la eficiencia de intercepción de la radiación estimada a partir de la fPAR a lo largo del ciclo no difirió entre tratamientos (Figura 1). El área bajo la curva de la fPAR a lo largo del ciclo (AUC; variable sin unidades) fueron similares entre todos los tratamientos sin diferencia significativa ($p=0,909$). Cabe destacar que los rankings relativos entre tratamientos de la fPAR a lo largo del ciclo no fueron sostenidos, sino que un tratamiento que presentó mayor fPAR inicial (por ejemplo, T3 y T5) disminuyeron su fPAR relativa a los demás tratamientos hacia antesis, momento en el cual otros tratamientos tuvieron un mayor valor relativo (por ejemplo, T2 y T4).

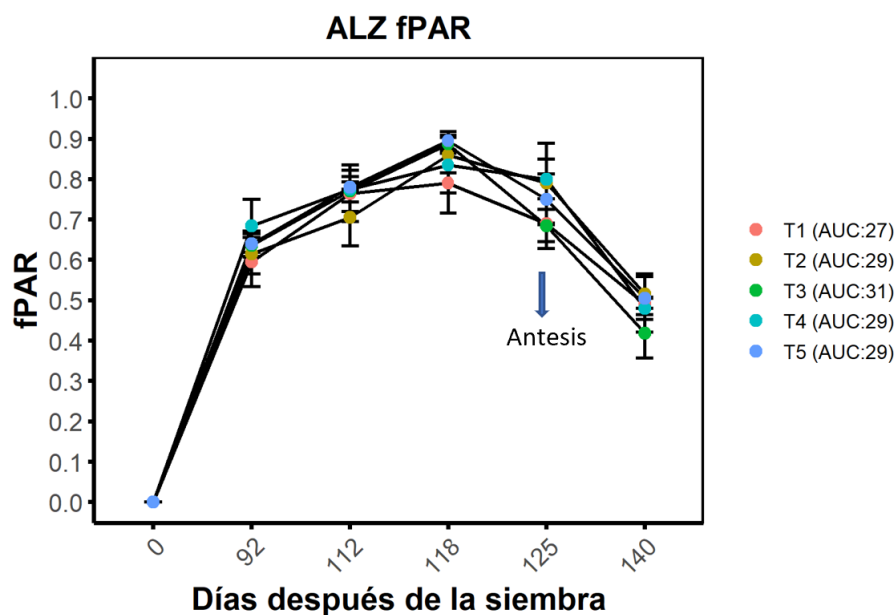


Figura 1. Evolución de la fPAR a lo largo del ciclo del cultivo de trigo para los tratamientos T1, T2, T3, T4 y T5 en América, Buenos Aires, en la campaña 2025-2026. Se indica la fecha de antesis. El valor promedio de fPAR para cada tratamiento en cada fecha se indica con un punto y las barras de error indican el desvío estándar. Los valores indicados del AUC son el promedio de tres repeticiones de la integral del área bajo la curva a lo largo de todo el ciclo del cultivo.

ii) Componentes ecofisiológicos y numéricos del rendimiento

El rendimiento promedio del ensayo fue de 3332 kg/ha. No se observaron diferencias significativas entre tratamientos tanto para la biomasa, rendimiento, IC, número de granos (NG/m²) y peso de mil granos (PG). La tendencia general, pero con medias no diferentes entre tratamientos, fue de mayores valores medios de biomasa, rendimientos, IC y NG/m² para el T4 (Tabla 2, Figura2). Asimismo, la tendencia general, impulsado por un menor valor de biomasa, NG/m² y PG, fue de un menor rendimiento medio para el T2, aunque no diferente en términos estadísticos respecto del resto de los tratamientos (Tabla 2, Figura 2).

Tabla 2. Análisis de la varianza y comparación de medias (LSD Fisher; alfa = 0,05) del efecto de los tratamientos (T1, T2, T3, T4 y T5) para el rendimiento seco, la biomasa seca, el índice de cosecha (IC), el número de granos por metro cuadrado (NG/m²), el peso seco promedio de 1000 granos (PG) y el área bajo la curva (AUC). Se indica el p-valor del análisis de la varianza. Letras diferentes indican diferencias significativas. Para la combinación de producto y momento de aplicación de cada tratamiento ver la Tabla 1.

Tratamiento	Biomasa	Rendimiento	IC	NG	PG	AUC
T1	7737	3465	0,45	11327	30,3	27
T2	7717	3193	0,41	10594	29,6	29
T3	8498	3462	0,41	115928	29,2	31
T4	8602	3815	0,45	12416	30,1	29
T5	8117	3550	0,44	11530	30,4	29
p-valor	0,7258	0,597	0,5738	0,7296	0,948	0,807

Para Biomasa, Rendimiento valores expresados en Kg/Ha; 0%HR

Para NG valores expresados en granos_m²

Para PG, valores expresados en g; 0%HR

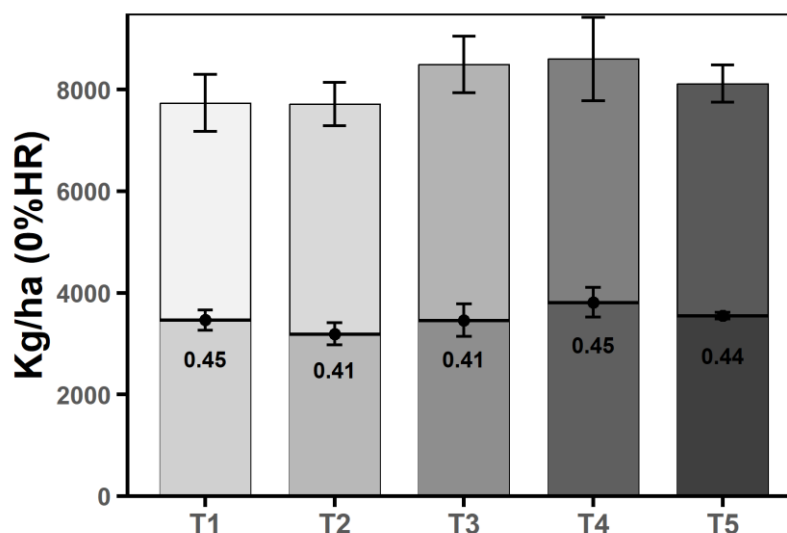


Figura 2. Biomasa aérea total y rendimiento de grano de trigo (kg/ha; 0% HR) para los tratamientos T1, T2, T3, T4 y T5. La altura completa de las barras representa la biomasa total, el segmento sombreado inferior de cada barra representa el rendimiento de grano y los puntos el valor medio de rendimiento. Las barras de error indican el error estándar de la media. Los valores numéricos de cada barra corresponden al índice de cosecha (IC).

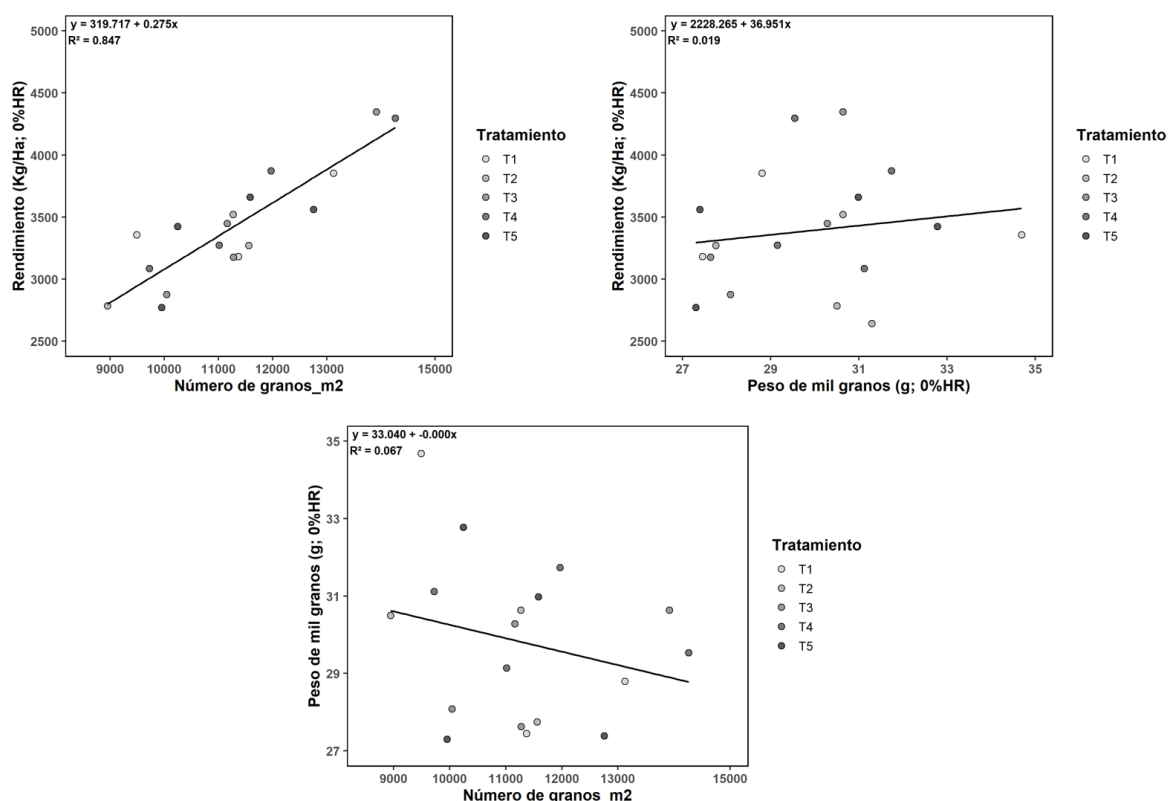


Figura 3. Relaciones entre el rendimiento de grano y sus componentes en trigo (valores expresados al 0% HR). Arriba izquierda: rendimiento (kg/ha) en función del número de granos (m^{-2}). Arriba derecha: rendimiento (kg/ha) en función del peso de mil granos (g). Abajo: peso de mil granos (g) en función del número de granos (m^{-2}). Los puntos corresponden a parcelas individuales y se distinguen por tratamiento (T1, T2, T3, T4 y T5). Las líneas indican el ajuste de regresión lineal; en cada panel se presenta la ecuación del modelo y el coeficiente de determinación (R^2).

Conclusiones

En la campaña 2025–2026, los rendimientos regionales se ubicaron por encima del promedio histórico, con registros superiores a 6000 kg/ha (0% HR). En el ensayo, el rendimiento promedio fue de 3332 kg/ha, sin diferencias significativas entre tratamientos para las variables registradas. La brecha entre el desempeño regional y el del ensayo se interpreta a partir de limitaciones ambientales propias del sitio, incluyendo la posición de loma y un trimestre septiembre–noviembre con precipitaciones por debajo del promedio histórico (167 mm), lo que restringió el crecimiento y la generación de rendimiento respecto del potencial observado a escala regional. En el marco general de comportamiento del cultivo mencionado y como es de esperar para el cultivo de trigo, el componente más afectado fue el número de granos (NG), que apareció como el principal componente que determinó las variaciones del rendimiento del ensayo (Figura 3). El peso de grano mostró valores típicos, pero explicó una proporción menor de la variabilidad del rendimiento (Figura 3).

Respecto del objetivo del ensayo, no se observaron respuestas de las estrategias evaluadas sobre la captura de radiación integrada durante el ciclo del cultivo (AUC del fPAR). Tampoco se

observaron diferencias significativas sobre las variables de rendimiento, biomasa, IC y componentes numéricos (Tabla 2). Una interpretación de estos resultados es que, a los niveles de rendimiento alcanzados, la fertilización nitrogenada de base (200 kg/ha de urea) fue suficiente para cubrir la demanda de nitrógeno del cultivo y sostener la construcción del rendimiento observado. Asumiendo requerimientos del orden de 30 kg de N por tonelada de grano, y considerando que la salida del invierno en condiciones de buena humedad pudo favorecer la mineralización y aportar N adicional al inicio del ciclo, es esperable que el sistema haya operado cerca de la saturación nitrogenada, reduciendo la probabilidad de detectar respuestas adicionales a las estrategias evaluadas. Adicionalmente, la fitoestimulación producto de la aplicación de los tratamientos respectivos puede haber generado efectos menores a los suficientes para generar marcadas diferencias de rendimiento producto de condiciones variables de estrés como alta demanda atmosférica en floración y una helada agronómica muy leve durante la primera mitad del llenado de granos. Las tendencias generales observadas de un mayor o menor rendimiento medio y sus respectivos componentes ecofisiológicos y numéricos no fueron suficientes para manifestar diferencias claras entre tratamientos para las condiciones ambientales exploradas.

En base a los resultados obtenidos, se sugiere repetir la evaluación en otros ambientes y/o campañas, priorizando situaciones variadas en términos de oferta ambiental, con mayor probabilidad de limitación nutricional (o mayor contraste en la oferta de N), de modo de generar condiciones más contrastantes que permitan identificar con mayor claridad posibles diferencias o comportamientos diferenciales entre tratamientos. No obstante, se considera fundamental explorar de manera profunda la generación del rendimiento a través de la cuantificación de la captura de radiación (AUC de la fPAR a lo largo del ciclo), los componentes ecofisiológicos (biomasa, IC) y numéricos (NG/m² y PG) tal como se realizó en el presente estudio.