

Estrategias de nutrición complementaria para maximizar rendimientos y calidad industrial del cultivo de trigo.

Ensayo multiambiental 2025/26 – Kelymar SA (CREA Las Petacas)

Ing Agrs Eduardo Corvi y Victor Moretto



Resumen:

La campaña triguera 2025/26 se desarrolló en un contexto de altos rendimientos potenciales (precipitaciones en el ciclo muy por encima de lo normal y condiciones de llenado de granos excelentes en lo que respecta a radiación y temperaturas) y creciente exigencia de calidad industrial. En campañas de trigo con altos rendimientos potenciales, es frecuente observar un fenómeno de dilución de la proteína, especialmente cuando la oferta de nitrógeno no acompaña la demanda del cultivo durante las etapas críticas de llenado de grano. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en sistemas trigueros intensivos, donde el incremento del rendimiento no siempre se traduce en mejoras proporcionales de la calidad industrial. Desde el punto de vista comercial, el mercado triguero remunera crecientemente la calidad panadera, particularmente a través de umbrales de proteína, gluten y peso hectolítrico. Lotes que no alcanzan dichas especificaciones pueden sufrir descuentos o quedar fuera de determinados destinos industriales. En este contexto, los esquemas de fertilización exclusivamente orientados a rendimiento pueden resultar insuficientes para capturar valor adicional, mientras que incrementos indiscriminados de nitrógeno implican mayores costos y riesgos de eficiencia decreciente. El desafío técnico consiste entonces en optimizar el balance rendimiento–calidad, maximizando la probabilidad de alcanzar estándares industriales sin introducir penalizaciones productivas ni incrementos injustificados de costos. En este escenario, Kelymar SA (CREA Las Petacas) evaluó en tres sitios estrategias de nutrición complementaria sobre una base común de 220 kg/ha de urea incorporadas en presiembra, con el objetivo de optimizar simultáneamente el rendimiento y la calidad del cultivo de trigo. Se evaluaron diferentes tipos de refertilización (SOLMIX, N18, BlueN) durante el ciclo del cultivo. Los resultados estadísticos muestran que el sitio fue el principal factor explicativo del rendimiento y del peso hectolítrico, mientras que los tratamientos nutricionales incidieron de forma significativa sobre proteína y gluten. En particular, SOL MIX (88 L/ha), con o sin N18, se ubicó consistentemente en el grupo superior para proteína y gluten, sin penalizar el rendimiento. La interacción tratamiento×sitio fue no significativa para proteína y significativa para gluten, indicando estabilidad del primero y sensibilidad ambiental del segundo. En conjunto, el ensayo demuestra que es posible mejorar calidad industrial y el rendimiento, aportando criterios técnicos sólidos para decisiones de manejo orientadas a mercados diferenciados.

Fertilización: Soluciones actuales y sus limitaciones

Fertilización nitrogenada tradicional: La aplicación de nitrógeno al suelo (urea u otras fuentes) constituye la base del manejo nutricional del trigo. Este enfoque permite sostener altos rendimientos, pero presenta limitaciones cuando: El nitrógeno no está disponible en las etapas de mayor demanda para calidad, el incremento del rendimiento genera dilución de proteína, la respuesta marginal al aumento de dosis se reduce.

Ajustes tardíos de nitrógeno: las refertilizaciones tardías (2 nudos/hoja bandera) buscan corregir deficiencias, pero su eficiencia depende fuertemente del ambiente (precipitaciones para incorporación) y del momento de aplicación. Esto no constituye una practica habitual en la zona central de Santa Fe.

Estrategias complementarias sin validación local: el uso de insumos complementarios sin evaluación estadística local puede generar respuestas erráticas, dificultando la toma de decisiones basada en evidencia.

En síntesis, las soluciones tradicionales suelen enfocarse en una sola dimensión (rendimiento) o carecer de información robusta para evaluar su impacto conjunto sobre calidad y productividad.

Objetivos y diseño:

El enfoque adoptado en este ensayo se basó en evaluar estrategias nutricionales complementarias sobre una base nitrogenada adecuada, bajo un diseño experimental riguroso y en múltiples ambientes. El Diseño experimental fue en Bloques Completos al Azar (BCA). Se realizaron 3 sitios para capturar variabilidad ambiental. Todos los tratamientos fueron fertilizados con fosforo, azufre y zinc en el momento de la siembra. Las parcelas experimentales fueron libres de plagas, malezas y enfermedades. El análisis estadístico fue a través de ANOVA con sumas de cuadrados tipo III, permitiendo evaluar efectos principales e interacciones y un test de significancia LSD de Fisher ($\alpha = 0,10$) para comparación de medias. Se analizaron las siguientes variables: rendimiento (kg/ha), Proteína (%), Gluten, Peso hectolítrico (PH). Este enfoque permitió analizar simultáneamente los componentes productivos y cualitativos del cultivo. Los tratamientos realizados fueron los siguientes:

Testigo

Testigo + N18*

Testigo + Sol MIX* + N18

Testigo + Sol MIX

Testigo + BlueN*

Testigo + BlueN + N18

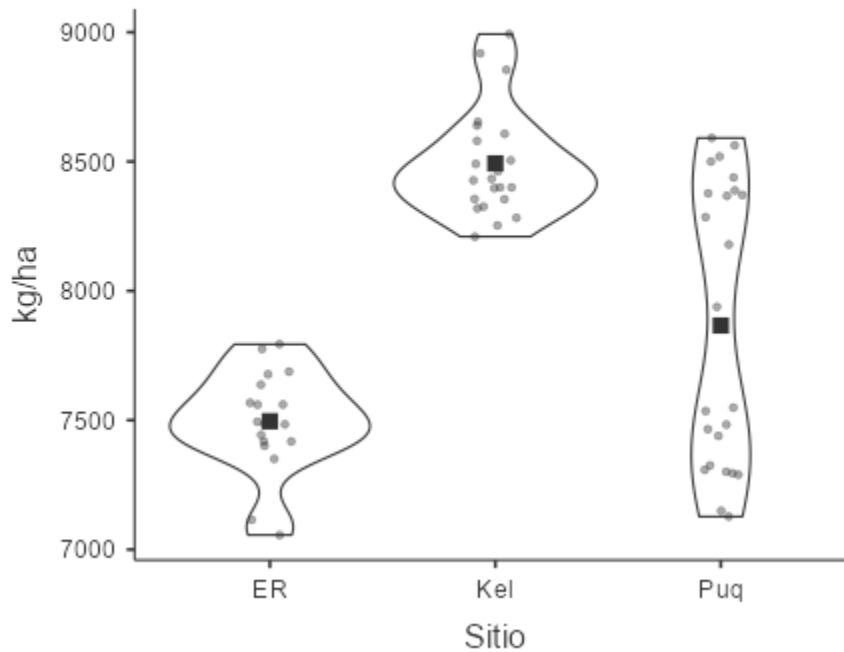
**N18: Nitroplus 18 de empresa Stoller (18% N + 7%Ca)*

*SolMix de empresa Bunge (30% N + 2.6%S)

*BlueN de empresa Stoller (*Methylobacterium symbioticum* fijador de N)

Rendimientos medios por sitios

kg/ha



Resultados:

Rendimiento:

- $R^2 = 0,61$ | R^2 ajustado = 0,47 | CV = 4,97%
- Tratamiento: no significativo ($p = 0,58$)
- Sitio: altamente significativo ($p < 0,0001$)
- Interacción tratamiento×sitio: no significativa

Los rendimientos promedio oscilaron entre 7.811 y 8.069 kg/ha, sin diferencias estadísticas entre tratamientos pero si entre sitios. Esto indica que las estrategias evaluadas no modificaron el rendimiento de manera significativa, y que el ambiente fue el principal determinante productivo.

Tabla Análisis de varianza:

Por tratamientos:

Test:LSD Fisher Alfa=0.10 DMS=284.37131

Error: 158107.3630 gl: 48

Tratamiento	Medias	n	E.E.
TESTIGO + N 18	7811.22	11	120.99 A
TESTIGO	7865.29	11	120.99 A
BLUEN	7912.48	11	120.99 A
BLUEN + N 18	7991.37	11	120.99 A
SOL MIX	8060.60	11	120.99 A
SOL MIX + N 18	8068.85	11	120.99 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Por Sitios:

Test:LSD Fisher Alfa=0.10 DMS=202.93420

Error: 158107.3630 gl: 48

sitio	Medias	n	E.E.
ER	7495.91	18	93.72 A
Puq	7866.10	24	81.17 B
Kel	8492.89	24	81.17 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Proteína (%):

- $R^2 = 0,85$ | R^2 ajustado = 0,80 | CV = 1,75%
- Tratamiento: significativo ($p < 0,0001$)
- Sitio: altamente significativo ($p < 0,0001$)
- Interacción tratamiento×sitio: no significativa ($p = 0,084$)

SOL MIX (88 L/ha), con y sin N18, alcanzó los valores más altos de proteína ($\approx 10,22$ – $10,24\%$), diferenciándose del resto de los tratamientos. La ausencia de interacción significativa indica que el ordenamiento de tratamientos fue consistente entre sitios.

Tabla Análisis de varianza:

Por tratamientos:

Test:LSD Fisher Alfa=0.10 DMS=0.12605

Error: 0.0305 gl: 47

Tratamiento	Medias	n	E.E.
TESTIGO + N 18	9.75	11	0.05 A
TESTIGO	9.83	11	0.05 A B
BLUEN	9.85	11	0.05 A B
BLUEN + N 18	9.88	10	0.06 B
SOL MIX	10.22	11	0.05 C
SOL MIX + N 18	10.24	11	0.05 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Por Sitios:

Test:LSD Fisher Alfa=0.10 DMS=0.08979

Error: 0.0305 gl: 47

sitio Medias n E.E.

ER	9.71	18	0.04	A
Kel	9.82	23	0.04	B
Puq	10.36	24	0.04	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Gluten:

- $R^2 = 0,80$ | R^2 ajustado = 0,73 | CV = 2,22%
- Tratamiento: significativo ($p < 0,0001$)
- Sitio: significativo ($p < 0,0001$)
- Interacción tratamiento×sitio: significativa ($p = 0,034$)

Los mayores valores de gluten correspondieron nuevamente a SOL MIX ($\approx 29,6$ – $29,8$). La interacción significativa indica que la magnitud de la respuesta varió según el sitio, lo que sugiere sensibilidad ambiental de este atributo.

Tabla Análisis de varianza:

Por tratamientos:

Test:LSD Fisher Alfa=0.10 DMS=0.45716

Error: 0.4016 gl: 47

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
TESTIGO + N 18	27.44	11	0.19	A
TESTIGO	27.82	11	0.19	A B
BLUEN + N 18	27.96	10	0.20	B
BLUEN	28.06	11	0.19	B
SOL MIX	29.58	11	0.19	C
SOL MIX + N 18	29.83	11	0.19	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Por Sitios:

Test:LSD Fisher Alfa=0.10 DMS=0.32566

Error: 0.4016 gl: 47

sitio Medias n E.E.

ER	27.92	18	0.15	A
Kel	28.47	23	0.13	B
Puq	28.96	24	0.13	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Peso hectolítrico (PH):

- $R^2 = 0,90$ | R^2 ajustado = 0,87 | CV = 0,55%
- Sitio: factor dominante ($p < 0,0001$)
- Tratamiento: significativo ($p = 0,0012$)

- Interacción: no significativa

El PH estuvo fuertemente determinado por el ambiente, con ajustes menores atribuibles al tratamiento.

Tabla Análisis de varianza:

Por tratamientos:

Test:LSD Fisher Alfa=0.10 DMS=0.31969

Error: 0.1964 gl: 47

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
TESTIGO	80.03	11	0.13	A
TESTIGO + N 18	80.17	11	0.13	A
BLUEN + N 18	80.55	10	0.14	B
BLUEN	80.58	11	0.13	B
SOL MIX	80.64	11	0.13	B
SOL MIX + N 18	80.81	11	0.13	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Por Sitios:

Test:LSD Fisher Alfa=0.10 DMS=0.22773

Error: 0.1964 gl: 47

sitio	Medias	n	E.E.	
Kel	78.93	23	0.09	A
Puq	81.08	24	0.09	B
ER	81.38	18	0.10	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Clusters:

Se realizó un análisis K-means clustering donde se agrupó las observaciones en función conjunta de: Rendimiento (kg/ha), Proteína (%), Gluten y PH. Las variables fueron estandarizadas (valores centrados en 0), por lo que los centroides se interpretan como desvíos relativos respecto del promedio general.

Se identificaron 2 clusters óptimos, lo que indica que los datos se organizan naturalmente en dos perfiles productivo–cualitativos bien diferenciados. Valores de los centroides por cluster:

Clúster	kg/ha	Prot (%)	Gluten	PH
1	+0.92	-0.39	-0.01	-1.18
2	-0.54	+0.23	+0.01	+0.69

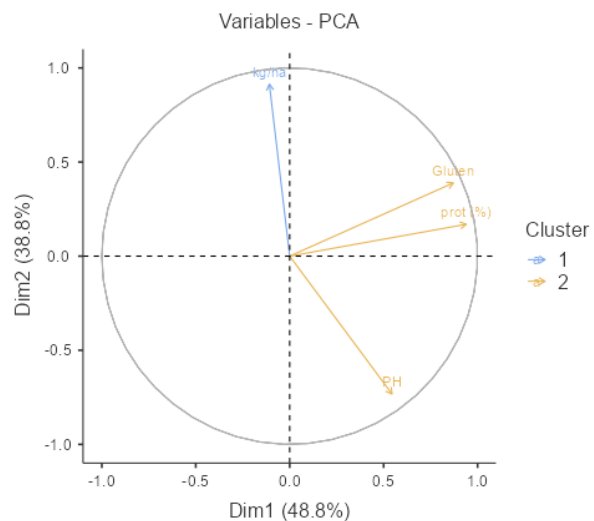
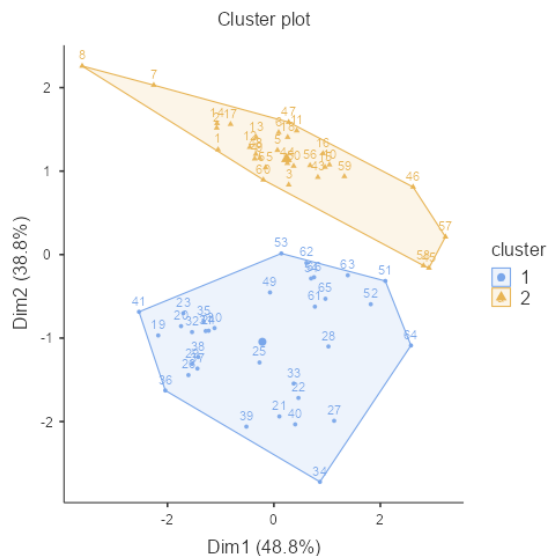
Clúster 1: Perfil productivo, Características

- Rendimiento por encima del promedio
- Proteína y gluten por debajo o cercanos al promedio

- PH claramente inferior al promedio
- Ambientes de alto potencial de rinde
- Riesgo de dilución de calidad
- Coincide con:
 - Sitios de mayor rinde observados en el ANOVA
 - Ausencia de respuesta en rendimiento a tratamientos
- Representa lotes donde la calidad no es el atributo dominante

Clúster 2: Perfil de calidad, Características:

- Rendimiento menor al promedio
- Proteína por encima del promedio
- PH claramente superior
- Gluten cercano al promedio
- Ambientes más favorables a calidad industrial
- Menor presión de dilución



El análisis de agrupamiento mediante K-means permitió identificar dos perfiles productivo-cualitativos bien definidos. El clúster 1 se caracterizó por mayores rendimientos y menor expresión de variables de calidad, mientras que el clúster 2 presentó mayores valores relativos de proteína y peso hectolítrico, con rendimientos levemente inferiores al promedio. Esta estructura confirma que el ambiente define perfiles de desempeño, y que las estrategias nutricionales evaluadas mejoran la calidad dentro de cada perfil sin alterar sustancialmente la pertenencia a uno u otro clúster.

Análisis económico:

Precio neto trigo: 175 U\$/ton

Precio urea: 620 U\$/ton

Precio N18: 3.4 U\$/lt

Precio BLUE N: 70 U\$/kg

Precio SolMIX: 450 U\$/kg

Precio aplicación: 7.5 U\$/ha

Precio Bruto trigo

175 U\$/ton

Tratamiento	kg/ha	Proteína (%)	GLUTEN	PH	dif a proteína 11%	descuento comercial (%)	Precio Neto	costo trat	Ingreso	Ing Marg	MB trat
Testigo	7865.29	9.83	27.82	80.03	1.17	-2	172	136.4	1348.9		✓ 1348.9
Testigo + N18	7811.22	9.75	27.44	80.17	1.25	-2.3	171	177.9	1335.5	-13.4	✗ 1157.6
SolMIX	8060.60	10.22	29.58	80.64	0.78	-0.1	175	196.2	1409.2	60.3	✗ 1213.0
SolMIX + N18	8068.85	10.24	29.83	80.81	0.76	0	175	237.7	1412.0	63.2	✗ 1174.4
BLUE N	7912.48	9.85	28.06	80.58	1.15	-2	172	167	1357.0	8.1	✗ 1190.0
BLUE N + N18	7991.37	9.88	27.96	80.55	1.12	-1.9	172	208.5	1371.9	23.0	✗ 1163.4

Como se puede observar en la tabla de análisis económico, ninguno de los tratamientos fue económicamente viables. El mejor resultado económico lo arrojó el tratamiento de base realizado con 220 kg/ha de urea incorporada en presiembra.

Conclusiones:

El rendimiento (kg/ha) estuvo fuertemente determinado por el sitio, sin detectarse diferencias estadísticas entre tratamientos. Los valores promedio oscilaron entre 7.800 y 8.070 kg/ha.

La proteína (%) mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos, con SOL MIX (88 L/ha), con y sin N18, ubicado consistentemente en el grupo superior. La ausencia de interacción tratamiento × sitio indica que esta respuesta fue estable entre ambientes.

El gluten también presentó diferencias significativas entre tratamientos, destacándose nuevamente SOL MIX. En este caso se observó interacción tratamiento × sitio, lo que sugiere que la magnitud de la respuesta dependió del ambiente.

El peso hectolítrico estuvo dominado por el efecto sitio, con diferencias menores atribuibles al tratamiento.

Ing Agr MSc Diego Hugo Pérez