

Rendimiento y eficiencia comparativa de uso de fósforo, nitrógeno y agua en trigo y cebada cervecera en la región centro y noroeste de Buenos Aires.

Resultados de tres campañas agrícolas: 2009, 2010 y 2011.

Proyecto Regional Agrícola, CRBAN

Ferraris, GN¹(*); Mousegne, F¹; Barraco, M²; Couretot, L¹; Cavo, J¹; Falconi, R³; Ferraris, O¹; Lemos, E¹; López de Sabando, M¹; Magnone, G¹; Martín, A¹; Melilli, P¹; Paganini, A⁴; Pérez, G¹; Pontoni, R¹; Zanettini, J¹; Scianca, C²; Solá, R¹; Tellería, MG¹; Ventimiglia, L¹.

¹ Área de Desarrollo Rural. INTA EEA Pergamino. ²INTA EEA General Villegas. ³El Ceibo Cereales, Arribeños. ⁴INTA EEA San Pedro. (*)nferraris@pergamino.inta.gov.ar Av Frondizi km 4,5 B2700WAA Pergamino Argentina; 54-02477-439026.

Introducción

Trigo y cebada cervecera son cultivos que comparten superficie de siembra en diversos ambientes de la Región Pampeana Argentina, y en particular en el Sudeste, Sudoeste, Centro y últimamente el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Aunque cada uno de estos cultivos tiene particularidades en cuanto a su manejo, enfermedades, requerimientos hídricos, dinámica de absorción de nutrientes y necesidades de fertilización, es común extrapolar recomendaciones y prácticas de manejo desde el trigo hacia la cebada, sin una adecuada validación.

En los cereales de invierno, Nitrógeno (N) y Fósforo (P) cumplen un rol relevante. El N es el elemento de mayor impacto en los rendimientos, y afecta parámetros sensibles relacionados con la calidad, como concentración de proteína, gluten, tamaño de grano y peso hectolítrico. Por su parte, P tiene incidencia sobre los rendimientos, y un efecto residual sobre el cultivo de verano que sigue a continuación.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización con NP, sobre 1. El rendimiento y 2. El consumo hídrico de los cultivos de trigo y cebada cervecera en la región centro y noroeste de Buenos Aires.

Materiales y métodos

Durante tres años consecutivos, se realizaron 12 experimentos de campo abarcando la región Centro, Medio Oeste y Norte de Buenos Aires. Los ensayos fueron conducidos en un diseño en bloques completos al azar, con tres repeticiones y tratamientos en arreglo factorial de 2 cultivos, 2 niveles de P y 3 niveles de N. Las parcelas de trigo y cebada fueron sembradas en la misma fecha y en forma apareada. El P se aplicó localizado a la siembra. El N fue incorporado o en cobertura total, siempre a la siembra del cultivo. Al momento de la cosecha fue evaluado el contenido de agua y N remanente. La soja de segunda no fue fertilizada, pero se midió el efecto residual de los nutrientes aplicados en el cultivo de invierno. La descripción de los tratamientos se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: *Tratamientos evaluados en los ensayos.*

Trat	Tratamientos (*)
T1	P0 N0
T2	P0 N50
T3	P0 N100
T4	P20 N0
T5	P20 N50
T6	P20 N100

(*) **Dosis de nutriente aportado como fertilizante**

Previo a la siembra, se realizó un análisis químico de suelo por bloque, cuyos resultados promedio se expresan en la Tabla 2, junto a una caracterización de los sitios experimentales.

Tabla 2: *Descripción de los sitios, variedades y análisis de suelo al momento de la siembra.*

Sitio	Serie de Suelo	Tipo de Suelo	Variedades Trigo - Cebada	MO (%)	N- Nitratos 0-60 cm (kg ha ⁻¹)	P-disp. mg kg ⁻¹
Pergamino 2009	Pergamino	Argiudol típico	Baguette 17 Scarlet	2,17	36,4	12,8
Arribeños 2009	Santa Isabel	Hapludol típico	Baguette 9 Scarlet	2,65	65,0	23,2
SA de Areco 2009	Capital Sarmiento	Argiudol típico	Baguette 11 P Scarlet	3,12	44,2	12,6
9 de Julio 2009	Norumbega	Hapludol éntico	DM Cronox Scarlet	3,42	67,3	5,2
Pergamino 2010	Pergamino	Argiudol típico	Baguette 17 Scarlet	2,57	41,6	10,7
Junín 2010	Junín	Hapludol típico	Klein Flecha Scarlet	1,90	45,6	6,1
25 de Mayo 2010	Norumbega 3	Hapludol éntico	Klein Tauro Scarlet	2,03	46,8	49,6
Bolívar 2010	Bolívar	Hapludol éntico	Baguette 11 P Scarlet	2,50	44,0	5,3
Pergamino 2011 loma	Pergamino	Argiudol típico	Baguette 17 Scarlet	2,75	78,5	15,1
Pergamino 2011 bajo	Pergamino	Argiudol típico	Baguette 17 Scarlet	3,39	85,2	27,0
Junín 2011	Junín	Hapludol típico	Baguette 601 Scarlet	2,52	91,5	12,9
Bolívar 2011	Bolívar	Hapludol éntico	DM Cronox Scarlet	3,39	42,9	27,0

La cosecha se realizó en forma manual, o mecánica. A la cosecha de soja se determinó rendimiento, obteniendo así la productividad acumulada de la secuencia. Para el estudio de los resultados se realizaron análisis de la varianza (ANVA), comparaciones de medias y análisis de regresión.

Resultados y discusión

A) Algunas características salientes de las campañas

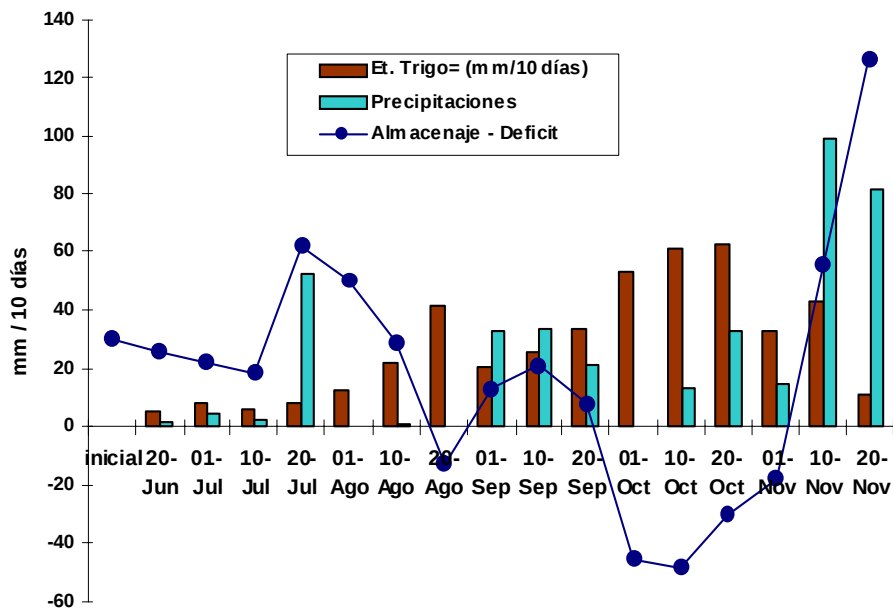


Figura 1.a. Año 2009

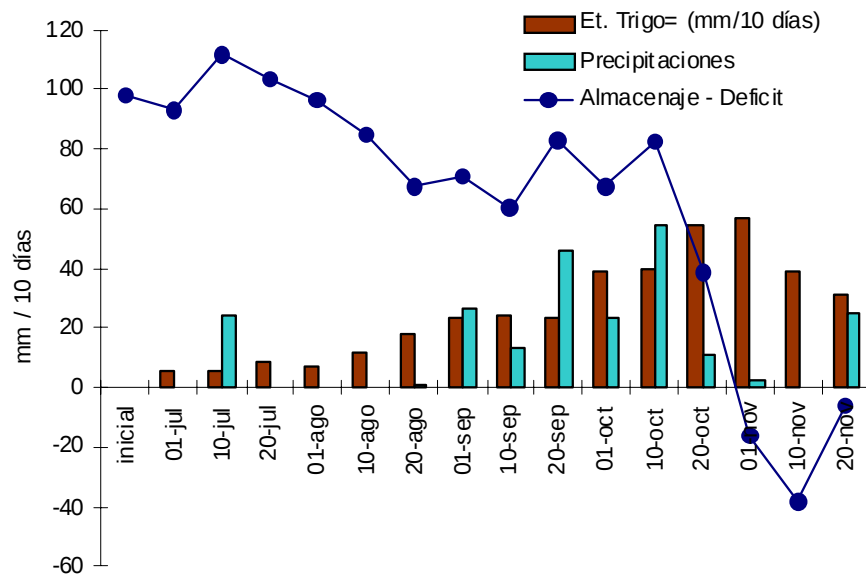


Figura 1.b. Año 2010.

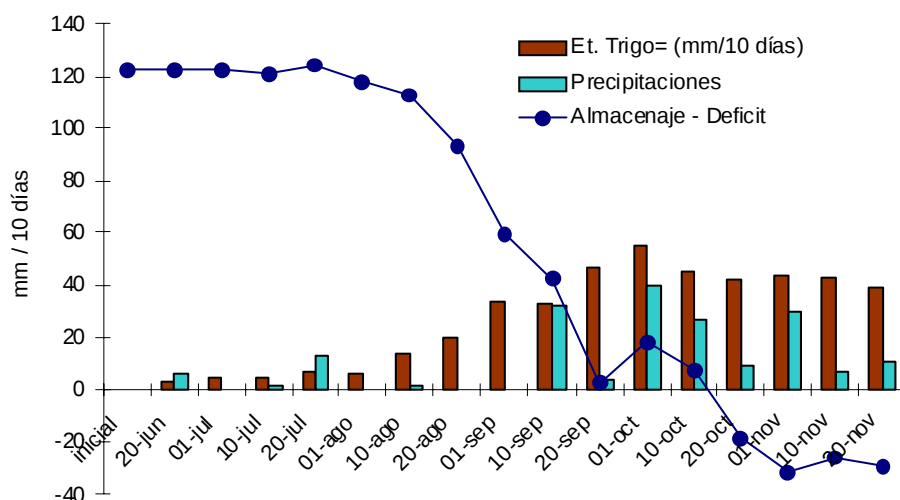


Figura 1.c. Año 2011

Figura 1: Evapotranspiración, precipitaciones y balance hídrico, expresados como lámina de agua útil (valores positivos) o déficit de evapotranspiración (valores negativos) para Trigo en Pergamino 1.a) Año 2009. 1.b) Año 2010 y 1.c) Año 2011. Valores acumulados en mm.

Las precipitaciones fueron muy reducidas y limitaron los rendimientos en 2009, más favorables en 2010, año en el que prácticamente no se registró déficit, y con una deficiencia moderada en 2011. (Figura 1). La magnitud del déficit tuvo que ver con las reservas hídricas y el proceso climático que estaba finalizando: Período La Niña seco en 2008/09 y 2010/11, ciclo El Niño húmedo en 2009/10.

En la Tabla 3 se presenta el cociente fototermal (Q) (Fisher, 1985) para las últimas 6 campañas agrícolas de trigo. Este término representa la relación existente entre la radiación efectiva diaria en superficie y la temperatura media diaria, y es una medida del potencial de crecimiento por unidad de tiempo térmico de desarrollo. El mismo fue favorable durante 2009 y 2010 (Tabla 3). Los rendimientos superiores de 2010 con relación a 2009 se explican en una mejor condición hídrica, producto de mayor almacenaje de agua al momento de sembrar el cultivo. Los datos para 2011 fueron cercanos a la media histórica, sin alcanzar los valores excepcionales de 2009 y 2010 (Tabla 3).

Tabla 3: Insolación efectiva (hs), Temperatura media (C°) y Cociente fototermal Q (T base 0°C) para el período crítico del cultivo de Trigo en la localidad de Pergamino. Se tomó entre 15 de setiembre al 15 de Octubre durante los años 2005 a 2009 y en 2011, y del 1 al 30 de Octubre en 2010, por encontrarse las etapas desfasadas en el tiempo durante esta campaña.

Condiciones ambientales	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010	Año 2011
Insolación Efectiva media (hs)	7,2	7,1	5,9	6,9	8,3	7,45	6,8
T media del período °C	15,1	17,1	15,0	16,4	13,4	14,8	14,8
Cociente fototermal (Q) (Mj m ⁻² día ⁻¹ °C ⁻¹)	1,24	1,10	1,12	1,10	1,56	1,34	1,19

B) Rendimientos y otras variables de cultivo

B1. Rendimientos de cebada cervecera y trigo.

En la Tabla 4 se presentan los rendimientos de los diferentes sitios experimentales.

Tabla 4: Rendimiento de Trigo y Cebada cervecera según dosis de Nitrógeno (N) y Fósforo (P) aplicados como fertilizante para doce sitios del centro-norte de Buenos Aires, en las campañas 2009, 2010 y 2011.

Localidad	Dosis NP	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada
		P0	P0	P20	P20
Pergamino 2009	N 0	3982	3771	3567	3321
	N 50	4422	4662	4818	4611
	N 100	5046	4349	5517	4442
Arribeños 2009	N0	2511	2865	2517	3909
	N50	2509	3552	2611	3341
	N100	2737	4196	2605	3001
9 de Julio 2009	N0	2186	3053	2695	3548
	N50	2928	3714	4061	5247
	N100	2946	4052	4190	5488
San Antonio de Areco 2009	N0	3310	4222	3891	3652
	N50	3188	4591	3362	5170
	N100	3649	5053	3978	5770
Junin 2010	N0	2125	1738	2986	3344
	N50	2094	2139	3112	3513
	N100	1841	2849	2796	3468
25 de mayo	N0	2417	2030	2257	2593
	N50	2377	2010	2650	3053
	N100	2083	2187	3110	2933
Bolívar 2010	N0	4506	3812	5670	6127
	N50	4424	4287	6624	6182
	N100	4985	4039	6362	6816
Pergamino 2010	N0	5118	4696	5943	5439
	N50	5150	5100	5864	5421
	N100	5250	5221	6332	6089
Pergamino 2011 loma	N0	4422	3805	4338	4838
	N50	4908	3984	4792	4851
	N100	4666	3623	4762	4580
Pergamino 2011 bajo	N0	4373	3476	4777	3796
	N50	4411	4221	5403	4544
	N100	4821	3921	5356	4349
Junín 2011	N0	3928	2291	3484	2101
	N50	3897	2802	5017	3730
	N100	4851	3356	4866	3596
Bolívar 2011	N0	5088	5155	6809	6362
	N50	6276	6175	6900	7824
	N100	6141	6634	7070	7545

Como es de esperar en una amplia red, los rendimientos abarcaron un rango extendido, de entre 1841 a 7070 kg ha⁻¹ en trigo, y 1738 a 7545 kg ha⁻¹ en cebada. El cultivo de menor rendimiento fue la cebada de 25 de Mayo 2010 con 2468 kg ha⁻¹, y el de mayor productividad la cebada de Bolívar 2011, alcanzando a 6616 kg ha⁻¹. Los rendimientos fueron levemente superiores en trigo sin fertilizante, y en cebada cuando se aplicó la dosis máxima (Figura 2)

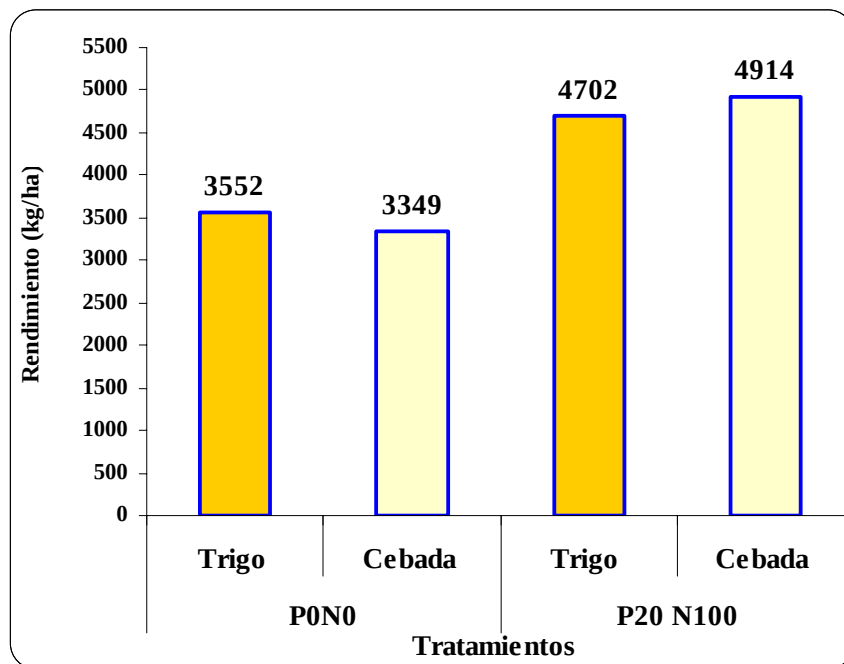


Figura 2: Producción de grano de trigo y cebada cervecera según nivel de fertilización con fósforo (P) y nitrógeno (N) media de 12 localidades en el Centro y Noroeste de Buenos Aires. Campañas 2009, 2010 y 2011.

En la Figura 3 se presenta la relación entre los rendimientos de trigo y cebada cervecera. Los puntos que están por debajo de la bisectriz (línea negra) indican mayor rendimiento del trigo, mientras que los que están por encima representan mayor rendimiento de cebada. La pendiente de la relación entre ambos rendimientos casi siempre es <1, indicando que a niveles bajos de productividad rindió más la cebada, mientras que al aumentar estos prevaleció el trigo. Para todo el grupo de datos, el punto de quiebre se encuentra en 4425 kg ha⁻¹.

El agregado de P (P20) no sólo aumentó los rendimientos, sino que mejoró la competitividad de la cebada respecto del trigo: aquella rindió más hasta una producción de 3770 kg ha⁻¹ con P0, y hasta 5140 kg ha⁻¹ con P20, abarcando en este último caso a la mayor parte de los sitios (Figura 4.a). De igual modo, prevaleció mayormente en los sitios de bajo rendimiento de la región norte, mientras que en la región centro la diferencia entre cultivos fue menor, y estuvo menos asociada al rendimiento (Figura 4.b). El efecto año se manifestó sobre los rendimientos relativos cebada:trigo. En 2009 y 2010 se cumplió la tendencia central de mejor performance relativa del trigo con el aumento de rendimiento medio (Figura 4.c). En cambio, en 2011 la tendencia fue inversa, aunque el trigo rindió más que la cebada en casi todos los sitios, hasta un rendimiento de 7665 kg ha⁻¹ o inferior (Figura 4.c). En el último año,

el retorno tardío de las precipitaciones –en forma continuada, recién a partir de octubre- (Figura 1.c) habría afectado en mayor medida a la cebada, por su ciclo más corto. Adicionalmente, esta especie mostró un alto porcentaje de quebrado de los tallos a cosecha, perjudicando su recolección. Ambos factores favorecieron la competitividad relativa del trigo.

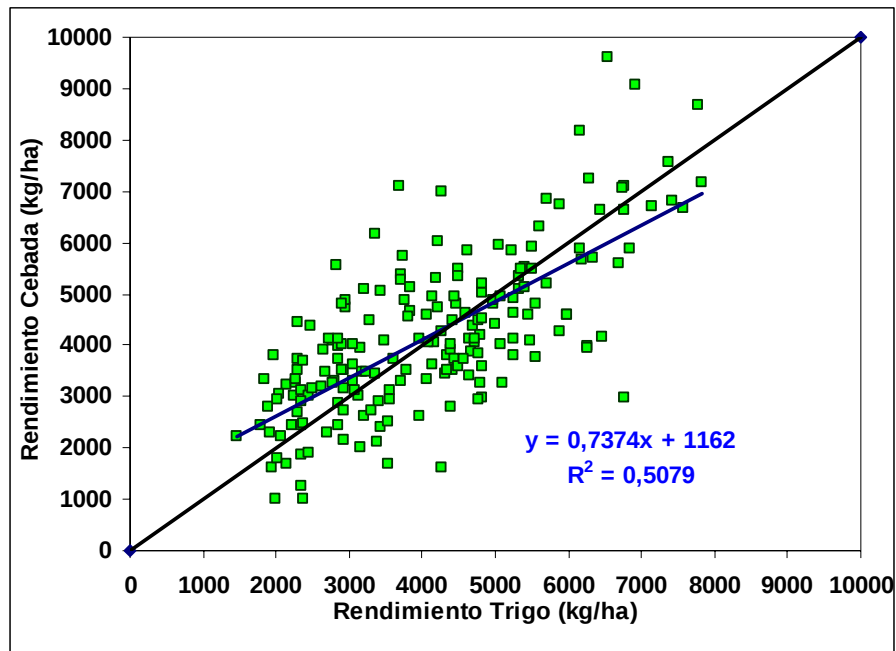


Figura 3: Relación entre rendimientos de cebada cervecera y trigo. Datos de tres campañas en 12 localidades del Centro y Noroeste de Buenos Aires.

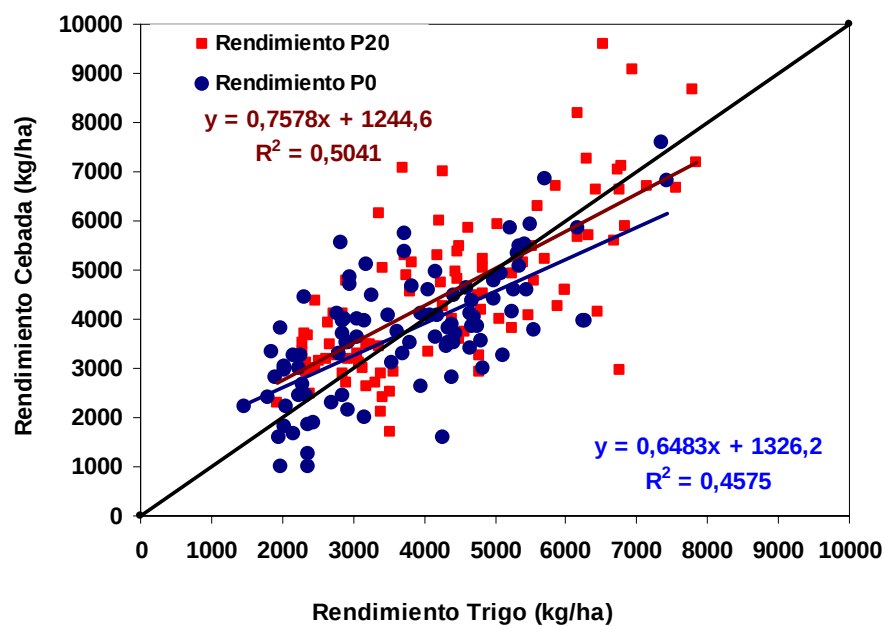


Figura 4.a

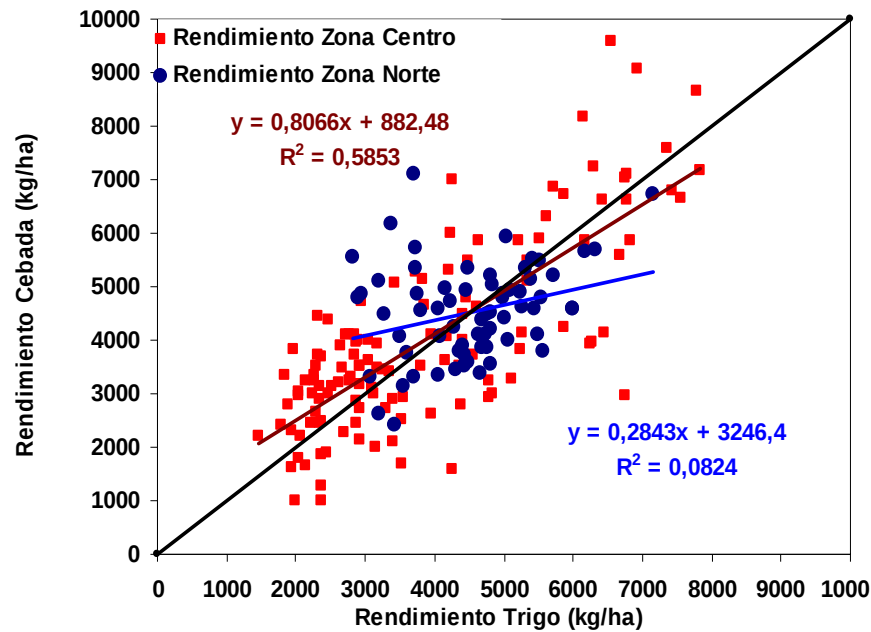


Figura 4.b

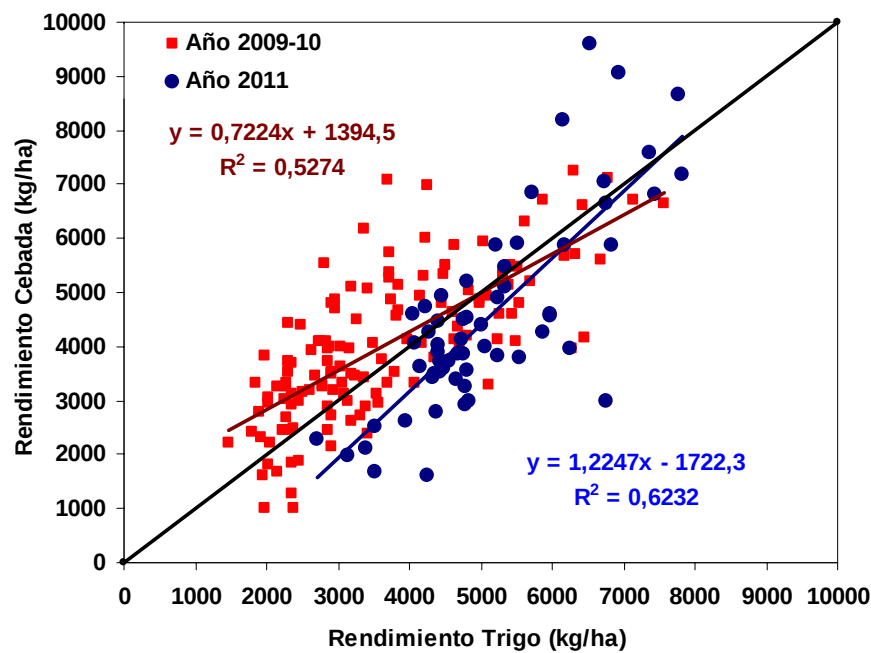


Figura 4.c

Figura 4: Relación entre rendimientos de cebada cervecera y trigo, de acuerdo con a) el nivel de fertilización fosforada: P0 y P20 b) El tipo de suelo y la región de cultivo: Argiudoles típicos de la zona norte- Pergamino y San Antonio de Areco-, Hapludoles típicos y énticos de la región centro Arribeños, Junín, 9 de Julio, Bolívar y 25 de Mayo y c) el año: 2009-2010 y 2011.

B2. Respuesta a la fertilización con Nitrógeno

La relación entre rendimiento y disponibilidad de N dependió de la especie y la fertilización fosforada (Figura 5). El rendimiento máximo estuvo limitado en la combinación **trigo-P0**, siendo cercano con **cebada-P0**. El agregado de P permitió incrementar la pendiente de respuesta y alcanzar rendimientos más elevados en **trigo-P20**. El nivel máximo de producción se consiguió en **cebada-P20**.

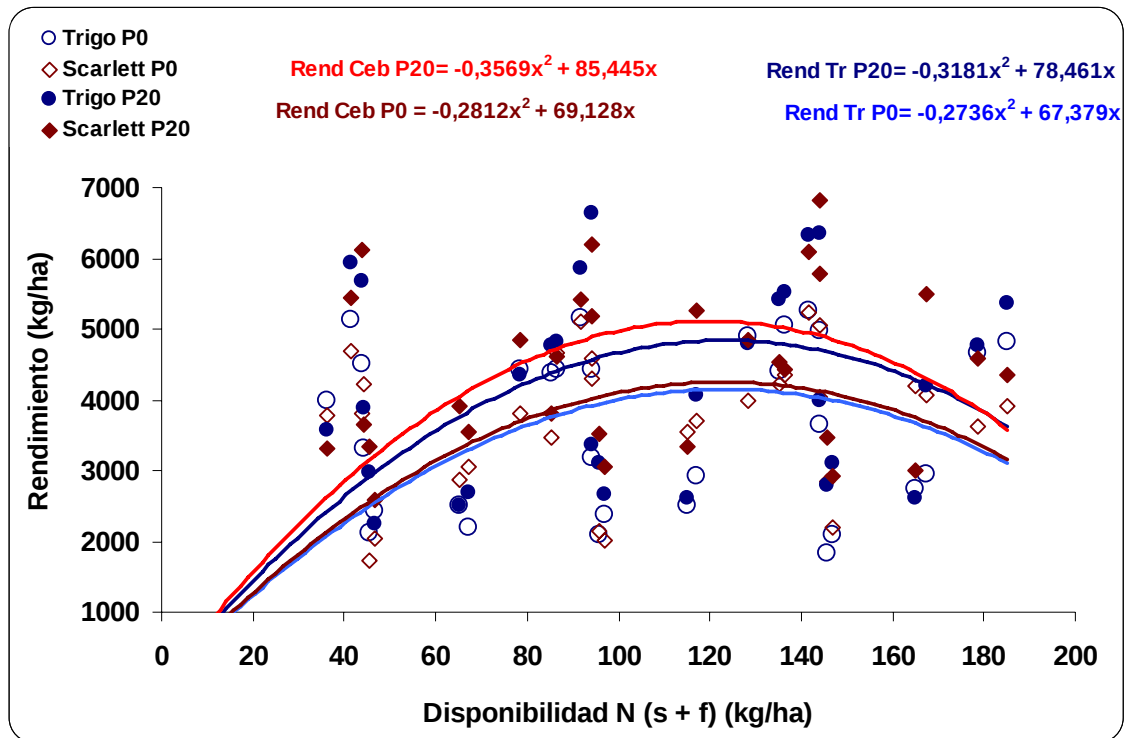


Figura 5: Relación entre rendimiento absoluto (kg/ha) y disponibilidad de N a la siembra (suelo 0-60 cm + fertilizante), según cultivo y nivel de P agregado. Las ecuaciones fueron forzadas a pasar por 0 considerando que **N disponible 0 = Rendimiento 0**. Datos de tres campañas en 12 localidades del Centro y Noroeste de Buenos Aires.

La cebada mostró una caída pronunciada en los rendimientos para los niveles muy bajos o nulos de fertilización. Sin embargo, el nivel de N en el que alcanzaron el 95 % del rendimiento máximo fue muy similar (Figura 6). Esto significa que la cebada cervecera fue muy eficiente para aprovechar el N agregado, especialmente en dosis bajas y con agregado de P (Figura 6). La EUN entre trigo y cebada tendió a equipararse en niveles elevados de fertilización. Esto posibilitó que, de acuerdo con las relaciones ajustadas, la Dosis Optima Económica (**DOE**) tendiera a ser muy similar en las cuatro combinaciones evaluadas, entre 70,2 y 71,3 kgN ha⁻¹ (Figura 7).

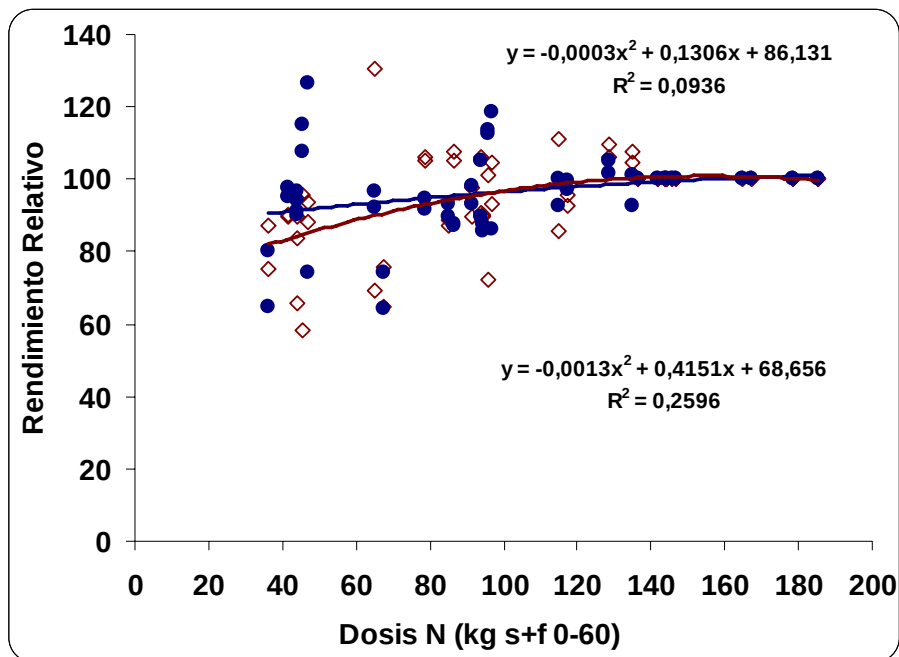


Figura 6: Rendimiento relativo ($RR = [\text{Rendimiento dosis } N_x / \text{Rendimiento dosis } N100] * 100$) en función de la disponibilidad de N a la siembra (suelo 0-60 cm + fertilizante) según cultivo. Rombos vacíos: cebada cervecera. Círculos llenos: Trigo

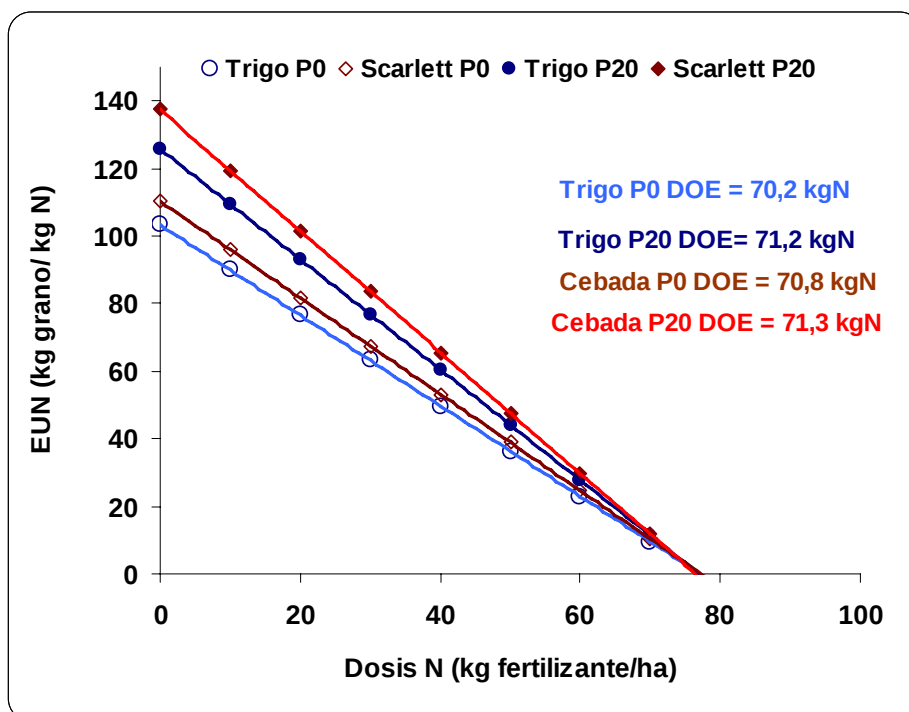


Figura 7: Eficiencia agronómica de uso de Nitrógeno para dosis crecientes de N como fertilizante, según cultivo y nivel de P inicial.

B3. Respuesta a la fertilización con Fósforo.

La respuesta a P fue de una magnitud elevada. En 9 de las 12 localidades, la respuesta a P en cebada fue superior a la observada en trigo, alcanzando una media para toda la red de 869 y 671 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 8). Esta tendencia se mantuvo estable en todo el rango de niveles de P explorado en este grupo de ensayos (Figura 9). Sin un ajuste destacable, la respuesta a P disminuyó con el aumento de la disponibilidad de P, tendencia observada en ambos cultivos, aunque respetando la diferencia de incremento a favor de la cebada (Figura 9).

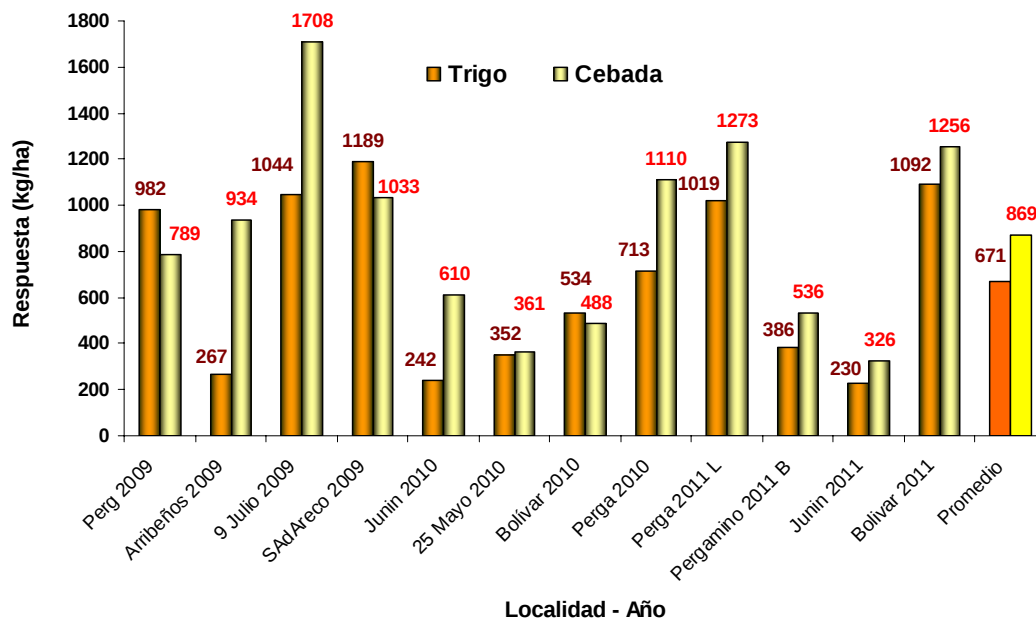


Figura 8: Respuesta a la fertilización con fósforo (20 kg ha⁻¹) según cultivo, localidad y año.

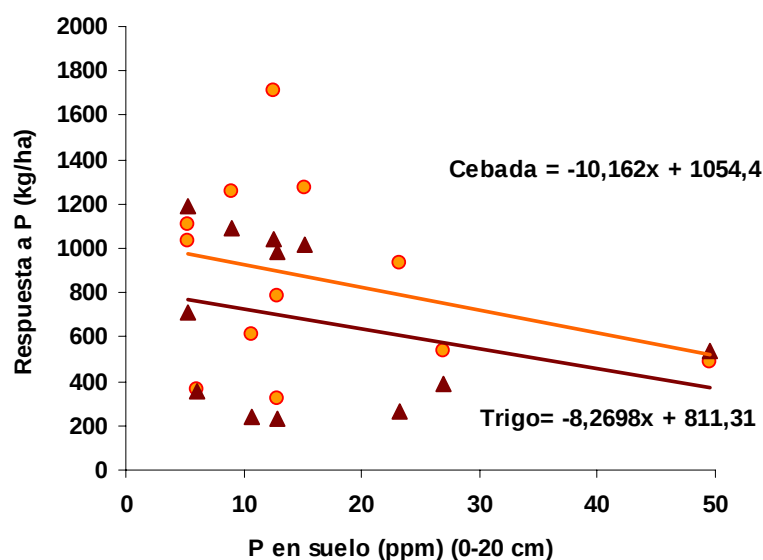


Figura 9: Relación entre respuesta a la aplicación de 20 kgP/ha y la disponibilidad de P Bray (0-20 cm), en trigo y cebada cervecera. Datos de tres campañas en 12 localidades del Centro y Noroeste de Buenos Aires.

La distribución de los datos de respuesta favoreció un análisis de cuadrantes, más que el ajuste de una función lineal. Esto se observa en la Figura 10. Se pueden separar dos poblaciones de datos: aquellas localidades con $P < 16 \text{ mg kg}^{-1}$, y las que poseían $P > 23 \text{ mg kg}^{-1}$, no habiendo sitios en el rango medio. Para ambas poblaciones de datos, pero especialmente en los sitios de alto P, la respuesta en cebada fue superior, confirmando la alta dependencia del nutriente en esta especie. Efectivamente, carencias de P provocan en cebada menor crecimiento, escasa cobertura y una notable retraso y desuniformidad fenológica, siendo este último efecto de menor magnitud en trigo. Además de la deficiencia nutricional *per se*, un cultivo de madurez retardada y desuniforme afecta su rendimiento, demora la siembra de los cultivos de segunda, y perjudica aspectos claves relacionados con la calidad del grano i.e. calibre, peso de los granos.

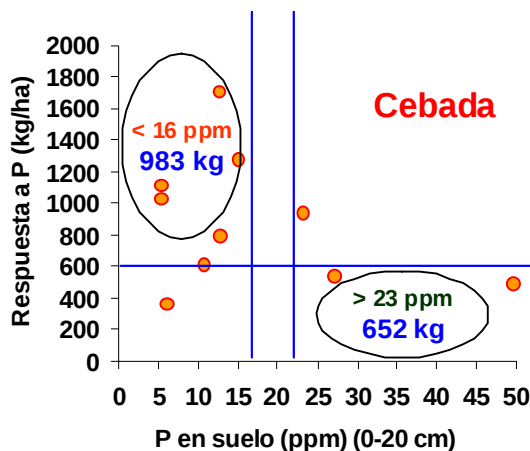


Figura 10.a

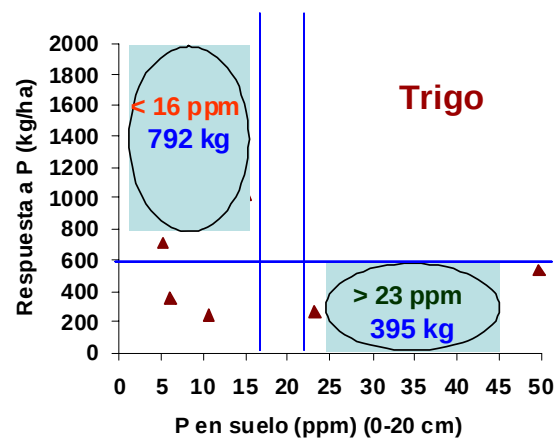


Figura 10.b

Figura 10: Poblaciones de respuesta a P según cultivo, separadas por el método de cuadrantes de Cate y Nelson considerando como variable independiente la concentración de P Bray en suelo (0-20 cm). a) Cebada cervecera. b) Trigo.

En la localidad de Pergamino, se cuantificó el Agua útil disponible para el cultivo (AU) en diversos estadios de crecimiento. A cosecha, la cebada en promedio reservó 22,8 mm más en 1m de profundidad. Más influyente aún fue el nivel de fertilización, ya que en los testigos se cuantificaron 28 mm más de AU con relación a los fertilizados, a causa de su menor crecimiento y producción (Tabla 5). Sin embargo, los rendimientos de la soja de segunda fueron superiores en cultivos fertilizados con N (Figura 11.a), y para el caso de cebada cuando se agregó también P (Figura 11.b). Claramente, el nivel de cobertura remanente fue más relevante que el consumo hídrico del cultivo previo. No se verificaron diferencias de rendimiento en la soja relacionadas al cultivo antecesor. Cabe aclarar que la soja de segunda sobre cebada y trigo se sembró en una misma fecha, aunque la primera fue cosechada con anterioridad.

Tabla 5: Agua útil remanente a cosecha (1 m de profundidad) en Pergamino, según cultivo, nivel de fertilización y campaña climática

	Año húmedo 2009	Año seco 2010	Año seco 2011	Promedio 3 años
Tratamiento	Agua útil (mm)	Agua útil (mm)	Agua útil (mm)	Agua útil (mm)
Trigo P0N0	55,4	35,4	0	30,3
Trigo P20N100	4,6	5,1	0	3,2
Cebada P0N0	61,8	60,5	40,1	54,1
Cebada P20N100	19,7	35,1	20,2	25,0

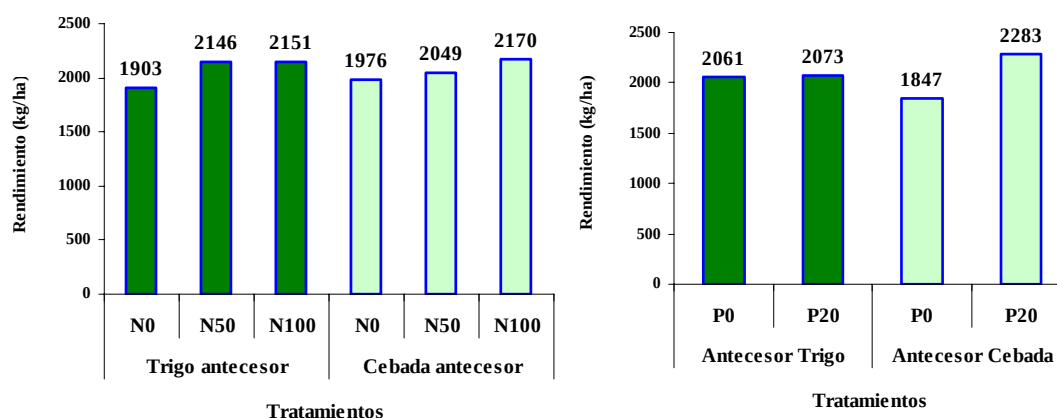


Figura 11: Rendimiento de grano de soja de segunda en Pergamino, promedio de los años 2011 y 2012, según antecesor y fertilización con nitrógeno (a) o fósforo (b).

Consideraciones finales

Cebada y trigo son alternativas invernales cuya factibilidad y conveniencia hoy está siendo discutida. Ambos comparten la estación de crecimiento, maquinaria, algunos agroquímicos y prácticas de manejo. Sin embargo difieren en la respuesta a diferentes factores de producción.

La cebada cervecera mostró ciclo más corto, menor consumo hídrico, alta sensibilidad a P, sensibilidad y buena respuesta a dosis bajas de N. Compitió ventajosamente en niveles bajos y medios de rendimiento, con adecuada fertilización fosforada. El trigo por su parte mostró adaptación a la región centro y norte, en ambientes de alto rendimiento. A pesar de esto, sostuvo bien su productividad en bajos niveles de fertilización, mostrando mayor cantidad de mecanismos compensatorios. Son necesarios muchos más estudios con el objetivo de identificar en que situación agroecológica puede ser especialmente conveniente optar por uno u otro cultivo.