

FERTILIZACIÓN COMBINADA CON N-P-S-Zn EN AVENA, CEBADA Y TRIGO

Marcelo Jose Lopez de Sabando ^{1*}, Juan María Erreguerena ¹, Ignacio Besteiro ¹, Kevin Alejandro Leaden ¹, Ulises Loizaga ¹, Martín Díaz-Zorita ²

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Tandil, Argentina

² Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa (La Pampa), Argentina

RESUMEN

En Argentina, nitrógeno (N) y fósforo (P) y recientemente azufre (S) y cinc (Zn) son nutrientes reconocidos como limitantes de la producción de los cereales de invierno. Las decisiones de manejo de la fertilización en avena (*Avena sativa* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) se realiza considerando aportes individuales de nutriente desconociendo la contribución combinada de elementos. La aplicación combinada de nutrientes mejoraría la respuesta a la fertilización comparada con el aporte individual de los elementos requiriendo su inclusión en los planteos o estrategias de manejo de la fertilización de cereales de invierno. El objetivo fue cuantificar los aportes a la producción de granos de avena, de cebada y de trigo de aplicar P, N, S, y Zn en forma individual y su relación con el uso combinado como NP y NPSZn. En 3 sitios (Tandil, San Manuel y Lobería, Argentina) y en tres cultivos (Trigo, Cebada y Avena) se realizaron experimentos de fertilización considerando aportes individuales y combinados de P, N, S y Zn. La fertilización combinada incorporando P, N, S y Zn presentó rendimientos mayores respecto a los efectos individuales de estos nutrientes en trigo y en cebada. Los incrementos de rendimientos atribuidos a la diferencia entre la fertilización combinada sobre la suma de los efectos de fertilización individual fueron de 330 kg ha⁻¹ en trigo y de 352 kg ha⁻¹ en cebada. En avena, los datos disponibles no permiten determinar diferencias entre la fertilización combinada y los aportes individuales de cada nutriente. Para las condiciones evaluadas tanto en trigo como en cebada, en la decisión de fertilización con P-N-S-Zn, las fertilizaciones combinadas capturan respuestas de rendimientos adicionales a lo logrado en las respuestas a los nutrientes individuales.

Palabras clave: cereales de invierno, nutrición de cultivos, siembra directa, tecnología de fertilización.

COMBINED FERTILIZATION WITH N-P-S-Zn IN OATS, BARLEY AND WHEAT

* Autor de contacto:

lopezdesabandom@hotmail.com

Recibido:
04-07-23

Recibido con revisiones:
19-10-23

Aceptado:
19-10-23

ABSTRACT

In Argentina, nitrogen (N) and phosphorus (P) and recently sulfur (S) and zinc (Zn) are recognized nutrients that limit the production of winter cereals. Fertilization decisions are made considering individual nutrient contributions, ignoring the combined contribution of elements. The combined application of nutrients would improve crops response to fertilization compared to the individual contribution of the elements. The objective was to quantify the contributions to the production of oat (*Avena sativa* L.), barley (*Hordeum vulgare* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) grains from either individual application of P, N, S, and Zn, or the combined

use as NP and NPSZn. Fertilization experiments were carried out at three sites (Tandil, San Manuel and Lobería) in Argentina. Combined fertilization (NPSZn) resulted in greater yields than the that obtained with the nutrients applied alone in both wheat and barley. The yield advantage of the combined fertilization over the sum of individual fertilization effects was 330 kg ha⁻¹ in wheat and 352 kg ha⁻¹ in barley. In oats, the available data do not allow determining difference between individual or combined fertilization strategies. Under the conditions of this study, combined fertilization promote additional yield responses in both wheat and barley compared to that achieved with individual nutrient application.

Keywords: winter cereals, crop nutrition, no tillage, fertilization technology.

INTRODUCCION

La avena (*Avena sativa* L.), la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y el trigo (*Triticum aestivum* L.) son los cereales de invierno con mayor superficie sembrada en la región pampeana de Argentina. En los tres cultivos, el nitrógeno (N) y el fósforo (P) son los macronutrientes que limitan con mayor frecuencia sus rendimientos de grano (Prystupa et al., 2012; Sadras & Calderini, 2020; Wehrhahne, 2006). En los últimos años se han determinado deficiencias de azufre (S) para la producción de trigo y de cebada. Sin embargo, estas deficiencias no son generalizadas (Carciochi et al., 2015; Michiels y Degenhart, 2004; Prystupa et al., 2007; Reussi Calvo et al., 2011). En el cultivo de trigo también se ha observado respuesta del rendimiento en grano con el agregado de cinc (Zn) en condiciones específicas de suelos y de manejos (Martinez Cuesta et al., 2021).

Resulta necesario para adecuar el manejo de la fertilización de estos cereales de invierno evaluar los incrementos de producción considerando la disponibilidad de los distintos nutrientes. Se han reportado efectos de interacción y efectos aditivos en las respuestas a la fertilización. La interacción se observa cuando la respuesta al agregado de un nutriente depende de la disponibilidad de otro nutriente (Black, 1993; Colwell, 1994). Los efectos aditivos corresponden cuando la respuesta a la fertilización de un nutriente es independiente a la disponibilidad de otro nutriente, no observándose diferencias entre la respuesta a la aplicación conjunta de los dos nutrientes y la suma de las respuestas observadas para cada nutriente por separado. Para condiciones de la región pampeana, se han evaluado los efectos considerando la respuesta a la fertilización con P, N y S en trigo, en soja (*Glycine max* (L.) Merr.), en maíz (*Zea mays* L.) y en girasol (*Helianthus annuus* L.) (Alvarez, 2009). Por ejemplo, Alvarez (2009) ha integrado distintas redes experimentales y describió un efecto aditivo en la fertilización con N, P y S en trigo. Los experimentos correspondieron principalmente a la región semiárida pampeana. Similares resultados fueron observados por Alvarez and Grigera (2004) en trigo durante 6 campañas incluyendo datos de experimentos con P y N y lotes de producción. En cambio, interacción positiva en la respuesta de trigo a la fertilización con N y P fueron observadas por Ron y Loewy (2000) en el sudoeste de la región pampeana. Estos autores observaron interacción positiva bajo condiciones de menores niveles de materia orgánica y con ciclo de cultivos intermedios y cortos. En cebada y en avena en la región pampeana no se han integrado redes experimentales para evaluar los efectos de fertilización con estos nutrientes.

En la región pampeana se han reportado efectos de degradación de los suelos y disminución de la disponibilidad de los principales macronutrientes (Sainz Rozas et al., 2019). Entre las implicancias de la menor disponibilidad de nutrientes en los suelos corresponde un incremento en el uso de fertilizaciones tanto con nutrientes frecuentemente utilizados como N y P, como con otros utilizados con frecuencia menor como S y Zn. En condiciones en las que es esperable o predecible la limitación múltiple N-P-S-Zn al crecimiento de cereales de invierno, la contribución de la fertilización a la producción disminuye, con diferencias entre cultivos y niveles de producción, al plantearse estrategias simplificadas o individuales de fertilización. Nuestros objetivos fueron cuantificar, en cultivos de secano de la región pampeana Austral, (i) los aportes a la producción de granos de avena, de cebada y de trigo al aplicar P, N, S, y Zn en forma individual y su relación con el uso combinado como NP y NPSZn, y (ii) el aporte del efecto de interacción entre los nutrientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y descripción general de los experimentos

Los experimentos de fertilización se realizaron en los cultivos de avena, cebada y trigo durante las campañas 2017 a 2021 en 3 localidades de la región de la Pampa Austral (Tandil, San Manuel y Lobería) (Hall et al. 1992). Los sitios seleccionados poseen suelos Argiudoles con variabilidad de profundidad de los horizontes petrocálcicos (Tabla 1). En cada sitio se realizaron experimentos de fertilización con P, N, S y Zn, cuyos

tratamientos se detallan en Tabla 2. El diseño de los experimentos fue en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. El tamaño de las unidades experimentales fue de 10 surcos separados a 0,2 m por 6 metros de largo (12 m²). El manejo de los cultivos se realizó en secano, bajo prácticas de siembra directa frecuentes en planteos de alta producción zonales, tanto en época de siembra, densidad, cultivar y control de malezas y enfermedades.

En el momento de la siembra, se tomaron 30 muestras compuestas de suelo. De 0 a 0,2 m de profundidad se determinó textura (Walter et al., 1978), materia orgánica (Nelson & Sommers, 1996), P extractable (Kuo, 1996), N mineralizado en incubación anaeróbica de 7 días (Gianello & Bremner, 1986), pH (1:2,5 suelo:agua, por potenciometría) y Zn extractable-DTPA (Lindsay & Norvell, 1978). Además, N-NO₃⁻¹ y S-SO₄⁻² (Bremner, 1996) se determinaron en capas de 0,2 m hasta 0,6 m de profundidad cuando la profundidad del suelo lo permitía. El contenido de N-NO₃⁻ y S-SO₄⁻² del suelo hasta los 0,6 m de profundidad se estimó considerando una densidad aparente media de 1,28 Mg m⁻³. Además, en cada sitio se determinaron los suelos predominantes y se evaluó la profundidad donde iniciaba el horizonte petrocálcico.

La cosecha de los granos se realizó con cosechadora experimental, recolectando la totalidad de las parcelas. Los datos se ajustaron a humedad de comercialización de cada cultivo (i.e., 140, 120 y 140 g kg⁻¹ para avena, cebada y trigo, respectivamente).

Tabla 1: Detalle de los experimentos: Sitio (combinación de localidad y año de realización), profundidad de horizonte petrocálcico, propiedades de suelo y cultivares de trigo, cebada y/o avena. Pe: Fósforo extractable. Nan: N mineralizado en incubación anaeróbica.

Table 1: Details of the experiments: Site (Location and year), depth of the petrocalcic horizon, soil properties and cultivars of wheat, barley and/or oats. Pe: extractable phosphorus. Nan: N mineralized in anaerobic incubation.

Sitios: Localidad (año)	Profundidad de horizonte petrocálcico (m)	Materia orgánica (g kg ⁻¹)	Pe (mg kg ⁻¹)	pH	Nan (mg kg ⁻¹)	Zn-DTPA (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ⁻² (kg ha ⁻¹)	N-NO ₃ ⁻¹ (kg ha ⁻¹)	Cultivares		
									0 a 0,2 m		
Tandil (2017)	>1,00 m	42	8,0	6,3	42,6	1,1	38,2	42,1	Ceibo	Andreia	*
Loberia (2018)	>1,00 m	42	10,0	5,9	47,0	1,0	35,4	49,1	SY 120	Andreia	Aiken
San Manuel (2018)	0,45 m	57	9,5	6,5	87,9	1,2	33,6	65,3	*	Andreia	*
Tandil (2019)	>1,00 m	49	9,0	6,3	72,0	1,2	28,8	55,0	Cumelen	Overture	Calen
San Manuel (2019)	0,57 m	42	12,2	6,7	45,0	1,0	34,2	51,0	SY 120	Overture	Calen
San Manuel (2020)	0,65 m	43	11,0	6,8	50,0	0,8	34,7	41,5	Saeta	Andreia	Lucia
Tandil (2020)	>1,00 m	55	13,0	5,8	61,1	0,9	28,9	50,5	SY 109	Andreia	*
Tandil (2021)	>1,00 m	51	20,0	5,9	60,5	1,0	47,9	43,3	B 802	Andreia	*

(*) Cultivos sin experimento en el sitio.

(*) Crops without experiment on the site.

Tabla 2: Detalle de dosis de fósforo, nitrógeno, azufre y cinc aplicado y fuente de fertilizante utilizado según tratamientos.

Table 2: Rate of phosphorus, nitrogen, sulfur and zinc applied, and source of fertilizer used according to treatments.

Tratamientos	Fósforo (kg ha ⁻¹)	Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	Azufre (kg ha ⁻¹)	Cinc (kg ha ⁻¹)
		Fertilización		
PNSZn	20	120	15	1,5
PNS	20	120	15	0
PN	20	120	0	0
N	0	120	0	0
P	20	0	0	0
Testigo	0	0	0	0
Fuente de fertilizante	Fosfato monoamónico	Urea	Yeso	Foliar ZnO / Semilla Zn-EDTA
Grado (N-P-K-S ó Zn)	10-23-0-0	46-0-0-0	0-0-0-18,6	80% / 14%

Respuesta a la fertilización

Al considerar al P y al N, los tratamientos utilizados fueron: testigo sin fertilización, fertilización con P, fertilización con N y fertilización combinada con P y con N. En cada sitio, las respuestas (i.e., incremento de rendimiento de grano) a los nutrientes se calcularon como la diferencia entre cada tratamiento fertilizado y el testigo (Ecuación 1, 2 y 3). Se obtuvo así, para cada nutriente, una respuesta individual a P, una respuesta individual a N y otra a la aplicación conjunta de P y N (i.e. fertilización combinada).

$$IR_P = R_P - R_{Te} \quad \text{ec. 1}$$

$$IR_N = R_N - R_{Te} \quad \text{ec. 2}$$

$$IR_{PN} = R_{PN} - R_{Te} \quad \text{ec. 3}$$

donde IR_P es el incremento de rendimientos en grano por el agregado de P, IR_N es el incremento de rendimientos por el agregado de N, IR_{PN} es el incremento de rendimientos por el agregado de PN, R_P es rendimiento de tratamiento P, R_N es el rendimiento del tratamiento N, R_{PN} es el rendimiento del tratamiento PN y R_{Te} corresponde al rendimiento de tratamiento testigo.

El S y el Zn son nutrientes utilizados en condiciones de producción en formulaciones de fertilizantes en conjunto con P y/o con N. Las respuestas individuales al agregado de S y de Zn se estimaron por sustracción a partir de las diferencias entre los tratamientos PN, PNS y PNSZn según

$$IR_S = R_{PNS} - R_{PN} \quad \text{ec. 4}$$

$$IR_{Zn} = R_{PNSZn} - R_{PNS} \quad \text{ec. 5}$$

donde IR_S es el incremento de rendimientos en grano por el agregado de S, IR_{Zn} es el incremento de rendimientos por el agregado de Zn, R_{PNS} es rendimiento de tratamiento PNS, R_{PN} es rendimiento de tratamiento PN y R_{PNSZn} es rendimiento de tratamiento PNSZn.

La respuesta a la fertilización combinada se calculó para cada sitio como la diferencia entre los rendimientos de grano de los tratamientos con fertilización combinada (i.e., PN o PNSZn) y el tratamiento testigo sin fertilización (Ecuaciones 3 y 6).

$$IR_{PNSZn} = R_{PNSZn} - R_{Te} \quad \text{ec. 6}$$

donde IR_{PNSZn} es el incremento de rendimientos por el agregado de PNSZn, R_{PNSZn} es el rendimiento del tratamiento PNSZn y R_{Te} corresponde al rendimiento de tratamiento testigo.

El aporte individual de cada nutriente a la fertilización combinada se calculó como la proporción relativa del incremento de rendimiento de grano por el nutriente sobre la fertilización combinada (Ecuación 7). La proporción de los incrementos de rendimiento por la fertilización combinada que no fue explicada por los aportes individuales de los nutrientes fue considerada como aporte del efecto de interacción entre nutrientes (Ecuación 8).

$$Ap_{Nu} = (IR_{Nu} / IR_{FeC}) * 100 \quad \text{ec. 7}$$

$$I = 100 - (Ap_{Nu1} + Ap_{Nu2} + Ap_{Nun}) \quad \text{ec. 8}$$

donde Ap_{Nu} es el aporte individual del nutriente a la fertilización combinada (i.e., P, N, S y Zn), IR_{Nu} es el incremento de rendimientos en grano por el agregado del nutriente (i.e., IR_P , IR_N , IR_S o IR_{Zn}), IR_{FeC} es el incremento de rendimientos por la fertilización combinada (i.e., PN o PNSZn) e I es el aporte efecto interacción entre nutrientes.

Análisis estadístico

La evaluación de la respuesta a la aplicación individual de cada nutriente y de las combinaciones (i.e., la presencia de respuesta), a nivel de sitio, se realizó testeando si las respuestas promedio eran diferentes de 0 usando un test de t ($\alpha = 0,10$). Una vez que se determinó las respuestas individuales, se calculó la posible interacción entre nutrientes en las respuestas a la fertilización comparando por un test de t apareado las respuestas a las aplicaciones combinadas de nutrientes con la suma de las respuestas a las aplicaciones individuales o la suma de las respuestas de los nutrientes ($\alpha = 0,10$). Se consideró como par de datos los generados en cada sitio. En caso de no existir interacción a nivel de red, las respuestas a las aplicaciones combinadas y las sumas de las respuestas a las aplicaciones individuales no deberían diferir, indicando respuestas aditivas. Se realizaron regresiones de las interacciones así estimadas contra variables de sitio y el rendimiento de los tratamientos testigos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Rango de rendimientos explorados

Para las condiciones evaluadas se observaron rendimientos de trigo en el rango de 2375 a 8775 kg ha⁻¹, rendimientos de cebada de 2349 a 8650 kg ha⁻¹ y rendimientos de avena de 2407 a 5510 kg ha⁻¹. Los rangos de rendimientos explorados corresponden a condiciones de altos y de bajos niveles de rendimientos para los tres cultivos. Para trigo, se observaron rendimientos en rangos similares en experimentos de fertilización en área sudeste y serrana (Barbieri et al. 2009; Montaner et al., 2003). Mientras que se observaron rangos de rendimientos menores en los experimentos realizados en cebada (Prystupa et al., 2007; Prystupa et al., 2012) y en avena (Cardenau y Gonzalez Montaner, 1994; Wehrhahne, 2006). En cebada se observaron sitios con rendimientos menores a los descritos en los trabajos de Prystupa et al. (2007) y Prystupa et al. (2012). Mientras que en avena se observaron rendimientos mayores a los observados por Cardenau y Gonzalez Montaner (1994) y por Wehrhahne (2006).

Aportes individuales de los nutrientes sobre los rendimientos

La respuesta a la fertilización con P presentó diferencias según el cultivo y sitio. De los 4 sitios evaluados en avena, los datos disponibles mostraron diferencias por fertilización sobre el testigo en 2 sitios. En cebada, se evaluaron 8 sitios y se observaron 4 sitios con incrementos de rendimientos por la fertilización con P. Mientras que en trigo se evaluaron 7 sitios y se observó incrementos de rendimientos por la fertilización en 4 sitios (Tabla 3). Los resultados observados son coincidentes con lo reportado por Berardo et al. (1994) para suelos con niveles de carbono orgánico mayores a 3% y por Correndo y García (2016) que integraron datos de 103 ensayos de trigo con fertilización fosfatada en la región pampeana (1998-2014) de distintos autores.

En los tres cultivos evaluados, las respuestas a la fertilización con P mostraron asociación con los niveles de fósforo extractable en los primeros 0,2 m de suelos (Figura 1) y, en general, no mostraron asociación con los rendimientos logrados (datos no presentados). Al comparar las respuestas observadas con los resultados de Correndo y García (2016) se observó asociación de la respuesta al agregado de P en los tratamientos con disponibilidad de N y respuestas inferiores en los tratamientos sin N. En condiciones de tratamientos con fertilización con N, el 78% de los casos evaluados mostraron respuestas al agregado de P superiores a las observadas por Correndo y García (2016). Mientras que, bajo condiciones sin fertilización con N, las respuestas al agregado de fertilización con P fueron en todos los casos inferiores a las observadas por Correndo y García (2016) (Figura 1).

La eficiencia en la respuesta al agregado de P (i.e. cociente entre el incremento de producción de grano y la cantidad de P aplicado) en condiciones de adecuada oferta de N es coincidente con los observados por Correndo y García (2016) y por Alvarez and Grigera (2005) analizando los resultados según diferentes modelos de respuesta para la región Pampeana. Para niveles de fósforo extractable de 10 ppm en los tres cultivos se observó una eficiencia de respuesta al agregado de P de 40 kg de grano kg⁻¹ P aplicado. Esta eficiencia es menor con 20 ppm de fósforo extractable en los suelos, siendo en el orden de 20 kg de grano kg⁻¹ P aplicado. En condiciones sin fertilización con N, la eficiencia de respuesta al agregado de P es menor. Para niveles de fósforo extractable de 10 ppm en los tres cultivos se observó una eficiencia de respuesta al agregado de P de 25 kg de grano kg⁻¹ P aplicado y con 20 ppm de fósforo extractable en los suelos en el orden de 10 kg de grano kg⁻¹ P aplicado (Figura 1).

Tabla 3: Respuestas a la aplicación fósforo, de nitrógeno, de azufre y de cinc en 19 casos de producción de cereales de invierno en la región pampeana austral. El valor p indica el nivel de significancia de la comparación de cada tratamiento de nutrición con el control.

Table 3: Winter cereal responses to fertilization with phosphorus, nitrogen, sulfur and zinc in 19 cases in the southern Pampean region. The p value indicates the level of significance of the comparison of each nutrition treatment with the control.

Sitios (año)	Fósforo			Nitrógeno			Azufre			Cinc		
	Respuesta promedio kg ha ⁻¹	Desvio estandar	Valor de p	Respuesta promedio kg ha ⁻¹	Desvio estandar	Valor de p	Respuesta promedio kg ha ⁻¹	Desvio estandar	Valor de p	Respuesta promedio kg ha ⁻¹	Desvio estandar	Valor de p
Avena												
Loberia (2018)	567	226	0.049	910	63	0.002	222	382	0.421	-24	113	0.749
San Manuel (2019)	443	323	0.141	575	171	0.028	-7	444	0.981	172	215	0.300
San Manuel (2020)	36	308	0.859	795	570	0.137	-87	356	0.713	195	516	0.580
Tandil (2019)	386	66	0.077	838	22	0.012	725	149	0.092	44	88	0.611
Cebada												
Loberia (2018)	497	61	0.005	578	31	0.001	132	719	0.781	-54	199	0.687
San Manuel (2018)	478	97	0.014	777	105	0.006	239	441	0.446	-137	281	0.487
San Manuel (2019)	244	158	0.116	765	106	0.006	114	854	0.839	640	632	0.222
San Manuel (2020)	515	350	0.126	764	285	0.043	790	597	0.149	235	141	0.102
Tandil (2017)	650	789	0.290	1017	243	0.019	192	1411	0.836	242	1999	0.854
Tandil (2019)	556	181	0.144	430	607	0.500	517	1004	0.599	-333	508	0.524
Tandil (2020)	307	174	0.093	1377	208	0.008	280	147	0.081	85	115	0.330
Tandil (2021)	247	126	0.077	2231	124	0.001	71	282	0.706	-80	260	0.649
Trigo												
Loberia (2018)	532	67	0.005	1345	33	0.000	-61	284	0.746	-49	322	0.818
San Manuel (2019)	100	69	0.130	1461	349	0.019	-175	349	0.477	329	1219	0.686
San Manuel (2020)	427	72	0.009	431	45	0.004	415	215	0.079	133	266	0.477
Tandil (2017)	583	115	0.013	867	888	0.233	33	1913	0.979	-325	753	0.533
Tandil (2019)	551	210	0.168	722	69	0.043	-25	492	0.954	-295	230	0.320
Tandil (2020)	243	41	0.009	1494	278	0.011	254	207	0.167	270	129	0.069
Tandil (2021)	150	103	0.128	1900	57	0.000	-148	347	0.538	148	166	0.263

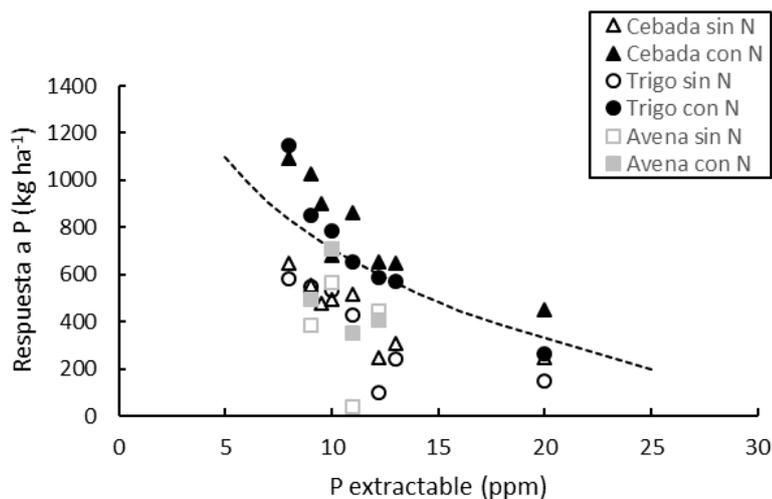


Figura 1: Respuesta de incremento de rendimiento a la fertilización con 20 kg de P ha⁻¹ según la disponibilidad de fósforo extractable en primeros 0,2 m de suelos para avena cebada y trigo con y sin fertilización con N. Línea continua punteada corresponde a adaptación de Correndo y García (2016) para trigo integrando resultados de distintos autores de 103 ensayos de fertilización con P en la región Pampeana (1998-2014).

Figure 1: Yield increment response to fertilization with 20 kg of phosphorus ha⁻¹ according to the availability of extractable phosphorus in the first 0,2 m of soils. Barley oats and wheat with and without nitrogen fertilization. Continuous dotted line represents the adaptation of Correndo and García (2016) for wheat, integrating results from different authors of 103 phosphorus fertilization experiments in the Pampean region (1998-2014).

En los tres cultivos y en la mayoría de los sitios evaluados se observó respuesta a la fertilización con N. De los nutrientes evaluados, el N permitió mayores incrementos de rendimiento por sitio además de mayor cantidad de sitios con respuestas (Tabla 3). Los niveles de respuestas en trigo y en cebada son coincidentes con los reportados por otros autores (Barbieri et al., 2009; Prystupa et al., 2012) y mostraron asociación principalmente con los niveles de rendimientos logrados y en menor medida con la disponibilidad de nitrógeno en los suelos (datos no presentados). Los rangos de respuesta a la fertilización con N fueron de 722 a 1900 kg ha⁻¹ en trigo y de 578 a 2231 kg ha⁻¹ en cebada. Las respuestas a la fertilización con N en avena tuvieron un rango de 575 a 910 kg ha⁻¹, fueron mayores a las reportadas por Cardenau y Gonzalez Montaner (1994) y por Wehrhahne (2006) en sudeste de región Pampeana. Estas diferencias podrían asociarse a que los rendimientos de avena observado en este experimento son mayores a los reportados por los autores. Los rendimientos mayores podrían asociarse, entre otros factores, a la utilización de cultivares con rendimientos mayores (Dillchneider Loza et al., 2022).

Para las condiciones evaluadas se observó un sitio en cada cultivo con respuesta a fertilización con S y únicamente un sitio de trigo con respuesta al agregado de Zn (Tabla 3). La fertilización con S permitió un incremento promedio del rendimiento de 158 kg ha⁻¹, mientras que las respuestas promedio al agregado de Zn fue de 77 kg ha⁻¹. Los resultados son coincidentes con lo observado por Reussi Calvo et al. (2011), Carciochi et al. (2015), Prystupa et al. (2007) y por Martínez Cuesta et al. (2021) en la región de estudio.

Aportes de la fertilización combinada sobre los rendimientos

Las diferencias de los rendimientos entre los tratamientos PNSZn y testigo (i.e. IR_{PNSZn}) fue en promedio de 1580, 2066 y 1970 kg ha⁻¹ en avena, cebada y trigo, respectivamente. Los aportes individuales de cada nutriente sobre la fertilización combinada mostraron similar importancia relativa en los tres cultivos. Los aportes de N fueron en promedio en rango de 46 a 57%, los aportes individuales de P fueron en promedio de 21 a 23%, los aportes individuales de S fueron de 3 a 11%, mientras que los aportes individuales de Zn fueron de 1 a 8% dependiendo del cultivo (Figura 2).

La fertilización combinada incorporando P, N, S y Zn mostro rendimientos mayores que la suma de las respuestas individuales de estos nutrientes en trigo ($p < 0,01$) y en cebada ($p < 0,05$). Los incrementos de

rendimientos atribuidos a la diferencia entre la fertilización combinada sobre la suma de las respuestas de la fertilización individual fueron de 330 kg ha⁻¹ en trigo y de 352 kg ha⁻¹ en cebada. Estos aumentos representan mejoras de 18% en las respuestas de trigo y de cebada a la fertilización con P, N, S y Zn (Figura 2). Estos resultados muestran diferencias con los observado por Alvarez (2009) al evaluar la fertilización en trigo y en girasol, y por Alvarez and Grigera (2004) al evaluar los efectos en trigo. La incorporación de ambientes con mayor rango de rendimientos a los observados por estos autores, y la incorporación de sitios con mayor variabilidad en la oferta de nutrientes en el suelo pueden ser parte de la explicación de las diferencias observadas.

En avena, los datos disponibles no permiten determinar diferencias entre la fertilización combinada (PNSZn) y la suma de los aportes individuales de cada nutriente (P+N+S+Zn) ($p>0,10$) (Figura 2). Para avena para grano son pocos los trabajos que comparan estrategias de fertilización combinada. La información de Cardenau y Gonzalez Montaner (1994) y de Wehrhahne (2006) no incorpora la evaluación de estrategias combinadas en el análisis de resultados, pero muestra similares rangos de respuestas a la fertilización con N a los observados en estos experimentos.

La diferencia de rendimientos entre los tratamientos de fertilización combinada con P y N y los tratamientos sin fertilización, fue en promedio de 1270, 1782 y 1859 kg ha⁻¹ en avena, cebada y trigo, respectivamente. Los aportes de S y de Zn en la fertilización combinada permitieron incrementos de rendimientos de 310 kg ha⁻¹ en avena, 289 kg ha⁻¹ en cebada y de 111 kg ha⁻¹ en trigo. En la fertilización combinada utilizando P y N los aportes individuales de cada nutriente (i.e., P y N) fueron mayores a los observados al considerar la fertilización combinada de P, N, S y Zn.

Tanto al considerar la respuesta a la fertilización combinada con P, N, S y Zn como al considerar la respuesta a la fertilización combinada con P y N sobre el testigo, se cuantificó el aporte individual de los nutrientes y los aportes no explicados se consideraron aportes del efecto de interacción. En cebada y en trigo la inclusión de S y Zn no modificó el aporte del efecto interacción. En promedio el aporte del efecto de interacción fue de 18%. Sin embargo, al considerar los diferentes sitios y los rendimientos de los tratamientos con fertilización combinada (PNSZn) se observó incrementos en los aportes relativos del efecto de interacción con aumento de los rendimientos. Para los sitios evaluados, la contribución de la fertilización a la producción disminuye, con diferencias entre cultivos y niveles de producción, al plantearse estrategias simplificadas o individuales de fertilización (Figura 3).

El estudio aporta información sobre la expresión de la fertilización con P y con N ayudada por la incorporación de elementos con limitaciones menos frecuentes en la región en estudio, como S y como Zn. Se destaca, en cebada y en trigo, la evidencia que la fertilización combinada (i.e., PNS o PNSZn) permite incrementos de producción de 18% sobre las fertilizaciones simples (i.e., efecto de interacción positivo). Estos resultados implican la consideración en los sistemas de producción de estrategias de fertilización combinadas, que consideren tanto la fertilización con P y con N como la inclusión de elementos menores. Si bien el estudio explora rango de rendimientos amplios en los tres cultivos y analiza la fertilización con S y con Zn en avena que ha sido poco estudiada en la región pampa Austral, deben considerarse algunas limitantes metodológicas. La cuantificación de las respuestas al agregado de nutrientes con limitaciones menos frecuentes (i.e., S y Zn) fueron por sustracción (i.g., RPNSZn – RPNS), el número de sitios de evaluados de avena son bajos (i.e., 4 sitios) y, si bien los niveles de fertilización corresponden a los manejos de producción frecuente en la región, los niveles de N y P en algunos sitios no alcanzan niveles de suficiencia. Trabajos futuros deberían abordar las respuestas al agregado de S y de Zn sin el aporte de N y de S, explorar comportamiento del efecto de interacción según rangos de rendimientos mayores a los analizados en este estudio y analizar el efecto de la proporción de los nutrientes en el grado de los fertilizantes comerciales sobre los aportes del efecto de interacción en la producción de granos.

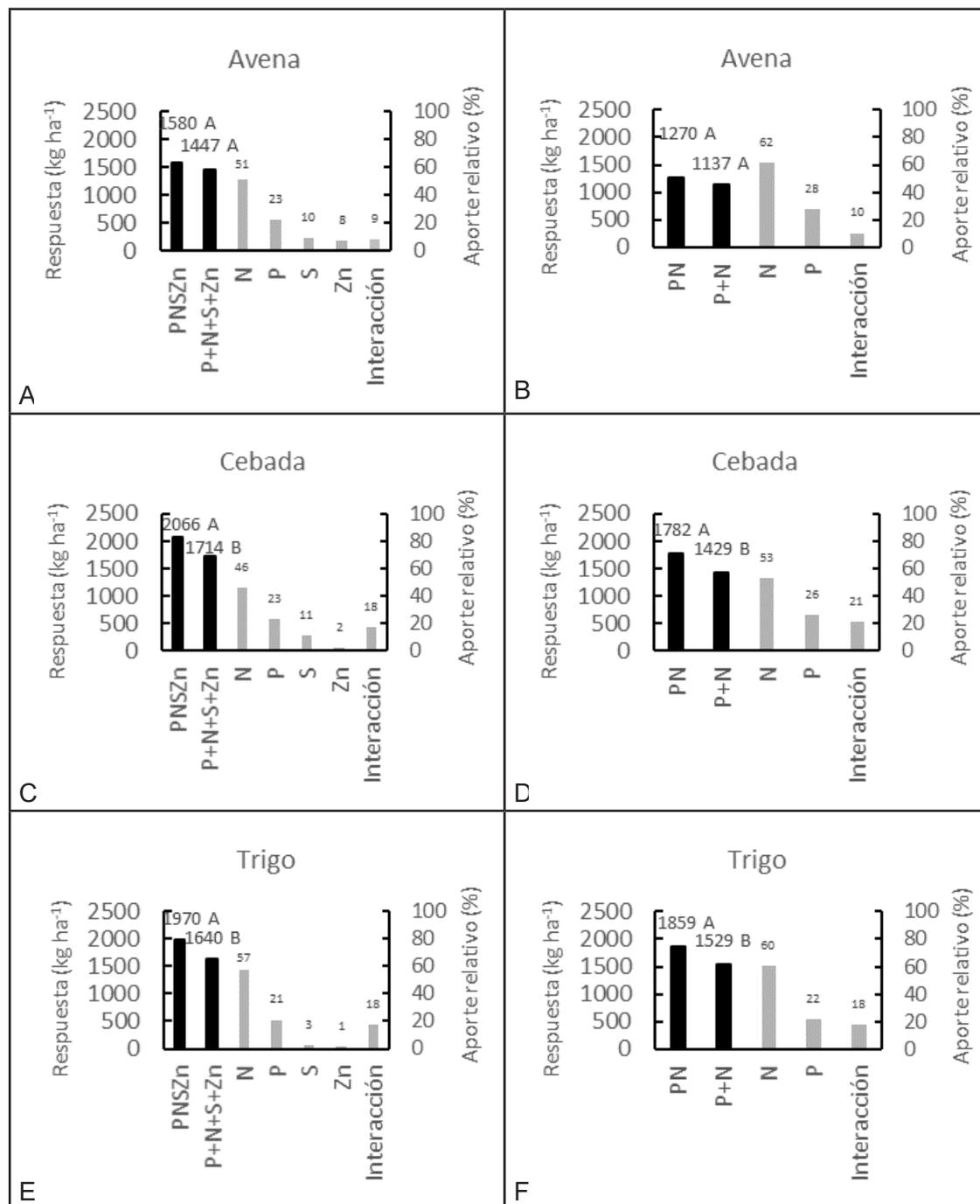


Figura 2: Respuesta promedio de toda la red de experimentos a la fertilización combinada y a la suma de los aportes individuales de nutrientes en barras negras y aportes relativos de los nutrientes individuales y del efecto de interacción en relación al aporte total de la fertilización combinada en barras grises según avena (A y B), cebada (C y D) y trigo (E y F). Fertilización con nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y cinc (Zn) en figuras A, C y E. Fertilización con Nitrógeno y Fósforo en figuras B, D y F. Experimentos realizados en San Manuel, Lobería, y Tandil durante las campañas 2017 a 2021. Letras diferentes indican diferencias entre la suma de aportes individuales de los nutrientes (P+N+S+Zn o P+N) y la fertilización combinada (PNSZn o PN) según Tukey ($\alpha = 0,10$).

Figure 2: Average response to combined fertilization and o the sum of individual contributions of nutrients (in black bars), and relative contributions of individual nutrients and the interaction effect in relation to the total contribution of combined fertilization (in gray bars). Oats (A and B), barley (C and D) and wheat (E and F) crops. Fertilization with nitrogen (N), phosphorus (P), sulfur (S) and zinc (Zn) in figures A, C and E. Fertilization with Nitrogen and Phosphorus in figures B, D and F. Experimental sites in San Manuel, Lobería and Tandil (years 2017 to 2021). Different letters indicate differences between the sum of individual nutrient inputs (P+N+S+Zn or P+N) and the combined fertilization (PNSZn or PN) according to Tukey ($\alpha = 0,10$).

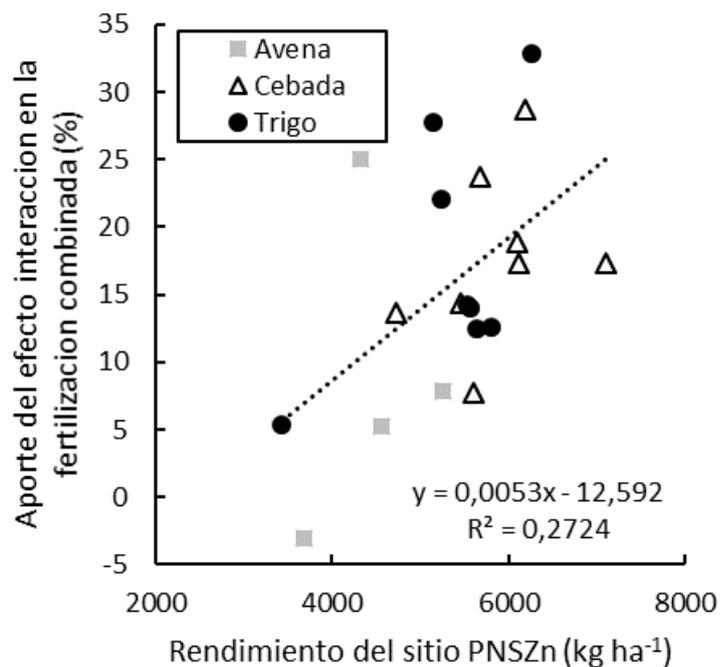


Figura 3: Aportes del efecto de interacción en la fertilización combinada según rendimientos promedio de sitio con nivel máximo de fertilización (PNSZn). Datos promedio de red de 14 experimentos realizados en San Manuel, Lobería y Tandil durante las campañas 2017 a 2021.

Figure 3: Contributions of the interaction in the combined fertilization according to average yields of the treatment with maximum level of fertilization (PNSZn) in each site. Average network data from 14 experiments carried out in San Manuel, Lobería and Tandil (2017 to 2021).

CONCLUSIONES

En trigo y en cebada la fertilización combinada incorporando P, N, S y Zn permitió incrementos de rendimientos mayores que la suma de los efectos individuales de estos nutrientes. La fertilización combinada representó mejoras del >18% en los incrementos de rendimientos asociados a la fertilización. En avena los datos disponibles no permitieron determinar diferencias comparando la fertilización combinada con los aportes individuales de cada nutriente. Para las condiciones evaluadas tanto en trigo como en cebada, en la decisión de fertilización con P-N-S-Zn, además de las respuestas individuales de los nutrientes hay respuestas complementarias que conduce a que en sitios de alta producción las fertilizaciones combinadas capturan respuestas de rendimientos adicionales a lo logrado en las respuestas a los nutrientes individuales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alvarez, R. (2009). Aditividad en la respuesta de los cultivos extensivos a la fertilización con distintos nutrientes en la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 43: 8-11.
- Alvarez, R. & Grigera, S. (2005). Analysis of Soil Fertility and Management Effects on Yields of Wheat and Corn in the Rolling Pampa of Argentina. *Agronomy and Crop Science*. 191:321-321.
- Barbieri, P., Echeverría, H.E. y Sainz Rozas, H. (2009). Dosis óptima económica de nitrógeno en trigo según momento de fertilización en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 27:115-125.
- Berardo, A. (1994). Aspectos generales de fertilización y manejo de trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA-Balcarce. *Boletín Técnico N° 128-EEA-INTA Balcarce*. Ediciones INTA, EEA Balcarce.
- Black, C.A. (1993). *Soil fertility evaluation and control* (Pag 729). Lewis Publishers Boca Raton.
- Bremner, J. M. (1996). Nitrogen Total. En D. L. Sparks (Ed). *Methods of Soil Analysis* (5th ed., pp. 1085-1121). Madison, WI, USA: Soil Science Society of America.
- Carciochi, W.D., Divito, G.A., Reussi Calvo, N.I. y Echeverría, H.E. (19-20 de mayo de 2015). ¿Qué sabemos del diagnóstico de azufre en los cultivos de la región pampeana argentina? *Actas Simposio Fertilidad 2015*.

- Cardenau, G. y Gonzalez Montaner, J. (Mayo de 1994). *Respuesta al riego y a la fertilización nitrogenada en trigo y avena en el sudeste de la provincia de Buenos Aires*. Actas de III Congreso Nacional de Trigo y Primer Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño-Invernal. Bahía Blanca, Buenos Aires. Página 53-54.
- Colwell, J.D. (1994). *Estimating fertilizer requirements: A Quantitative Approach*. CAB Internatinal. Inglaterra, 259 paginas.
- Correndo, A.A. y García, F.O. (2016). Trigo 2016. Pautas para el manejo nutricional del cultivo. *IPNI Cono Sur*. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1258>.
- Dillchneider Loza, A., Porta Siota, F., Figueruelo, A. y Funaro, D. (2022) *Cereales invernales. Resultados de ensayos de evaluación de cultivos y manejo en trigo, cebada, centeno, avena y triticale. Campaña 2021*. Ediciones INTA, EEA Anguil.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2011). InfoStat ver 2011. InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Gianello, C. & Bremner, J.M. (1986). A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17:195–214.
- González Montaner, J., Di Nápoli, M., Calviño, P., Mailland, N., Posborg, M., Dodorico, F. y Andenoche, J. (2003). Nitrógeno en trigo. *Revista de los CREA*. 272:56-59.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghersa, C.M. & Culot, J. (1992). Field-crop systems of the Pampas. En Pearson, C.J. (Ed.), *Field Crop Ecosystems Series: Ecosystems of the World*. (pp. 413-450). Elsevier Science Publishers.
- Kuo, S. (1996). Phosphorus. En D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis* (Part 3, pp. 869-919). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- Lindsay, W. L. & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428.
- Martinez Cuesta, N., Carciochi, W., Salvagiotti, F., Sainz Rozas, H., Wyngaard, N., Lopez de Sabando, M.J. & Barbieri, P. (2021). DTPA-extractable zinc threshold for wheat grain yield response to zinc fertilization in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal* 2021:1-6.
- Michiels, C. y Degenhart, S. (2004). Ensayo de fertilización en cebada cervecera, var Scarlett. *Informaciones agronómicas* 22: 18-20.
- Nelson, D. W. & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En D. L. Sparks (Ed), *Methods of Soil Analysis*. (pp. 961-1010). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- Prystupa, P., Bergh, R., Ferraris, G., Loewy, T., Gutierrez Boem, F.H. y Ventimiglia, L. (2007). *Fertilización: nitrogenada y azufrada en cebada cervecera*. Red INTA – Fertilizar. Actas de Simposio Fertilidad 2007: Bases para el manejo de la nutrición de los cultivos y los suelos. Pag. 50:56.
- Prystupa, P., Ferraris, G., Loewy, T., Gutierrez Boem, F.H., Ventimiglia, L., Couretot, L. y Bergh, R. (2012). Fertilización nitrogenada en cebada cervecera cv. Scarlett en la provincia de Buenos Aires. En S.A. Stenglein, M.V. Moreno, M. Cogliatti, W.J. Rogers, M.A. Carmona y R.S. Lavado (Eds), *Cereales de invierno. Investigación científico-técnica* (pp. 102-110). Editorial Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Reussi Calvo, N.I., Echeverría, H.E. & Sainz Rozas, H. (2011). Diagnosing sulphur deficiency in spring red wheat: plant analysis. *J. Plant Nutr.* 34: 573-589.
- Ron, M. y Loewy, T. (2000). Modelos de fertilización nitrogenada y fosforada para trigo en el Sudoeste Bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo* 18:44-49.
- Sadras, V. & Calderini, D. (2020). *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. Academic Press.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Martinez Cuesta, N., Angelini, H., Reussi Calvo, N. y Wyngaard, N. (8-9 mayo 2019). *Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana*. Actas del Simposio de Fertilidad 2019. Fertilizar Asociación Civil. Rosario, Argentina.
- Walter, N.F., Hallberg, G.R. & Fenton, T.E. (1978). Particle size analysis by the Iowa State University soil survey laboratory. En G. R. Hallberg (Ed), *Standard procedures for evaluation of quaternary materials in Iowa* (pp. 61-90). Iowa City, USA: Iowa Geological Survey.
- Wehrhahne, L. 2006. Avena: ensayo de fertilización con urea. *Carpeta de actualización técnica de cosecha fina 2005/06*. Chacra experimental de Barrow. Número 84.