

Eficiencia en el uso del nitrógeno del trigo en la región semiárida de Buenos Aires (Argentina): efectos de la dosis y momento de aplicación

Martínez, J.M.; J.A. Galantini y M.R. Landriscini

RESUMEN

En las regiones semiáridas, la errática de las precipitaciones dificulta la optimización de la fertilización. El objetivo fue analizar la influencia de la variabilidad climática sobre la respuesta a diferentes dosis y momentos de fertilización en la productividad del trigo y en la eficiencia en el uso del nitrógeno en un sitio de la región semiárida bonaerense. Durante cinco años se realizaron ensayos de fertilización con trigo, combinando dosis de N (0, 25, 50 y 100 kg ha⁻¹) y momentos de fertilización: siembra (Ns) y macollaje (Nm). Se evaluó la eficiencia agronómica en el uso del fertilizante aplicado (EUF) para la producción de materia seca (MS) y de grano, así como la recuperación aparente del nitrógeno (RAN). Se detectaron interacciones entre variables y las eficiencias. Para Nm se encontraron correlaciones significativas de todos los parámetros con las precipitaciones de octubre. La proteína en ambos momentos estuvo significativa e inversamente correlacionada con las precipitaciones del ciclo. Se observaron correlaciones significativas de EUF de MS y grano siguiendo el orden: Prec. Ciclo completo > Prec. primavera > Prec. Oct > Prec. Set. La variabilidad climática interanual demostró la mayor influencia sobre las eficiencias en el uso del N, independientemente del momento de aplicación.

Palabras clave

Momentos de fertilización; aplicaciones tardías; precipitaciones erráticas

Martínez, J.M.; J.A. Galantini and M.R. Landriscini, 2015. Nitrogen use efficiency for wheat in semiarid region of Buenos Aires (Argentina): effects of the dose and timing application. *Agriscientia* 32 (1): 15-27

SUMMARY

In semiarid regions optimal fertilization is difficult due to erratic rainfall. The aim of this study was to analyze the influence of climate variability on the response to different rates and timing of fertilization on wheat productivity and on efficiencies in the use of nitrogen in a site of the semiarid region of the province of Buenos Aires, Argentina. For five years, fertilization trials were conducted in wheat combining N rates (0, 25, 50 y 100 kg ha⁻¹) and times of fertilization: Seeding (Ns) and tillering (Nm). Agronomic efficiency (EUF) for dry matter (MS) and grain, and apparent recovery of nitrogen (RAN) were evaluated.

Interactions between variables (year, rates and times) and efficiencies were found. In Nm, significant correlations of all parameters were found with October rainfall. Protein for Ns and Nm was significantly and inversely correlated with full cycle rainfall. Significant correlations were found in EUF of MS and grain in this order: Full cycle rainfall > Spring rainfall > Oct rainfall > Set rainfall. Interannual climate variability showed the greatest influence on the nitrogen use efficiencies, regardless the application timing.

Key words

Fertilization timing; tillering application; erratic rainfalls

J.M. Martínez y M.R. Landriscini: CERZOS, CONICET, Universidad Nacional del Sur. J.A. Galantini: Comisión de Investigaciones Científicas (CIC, BA), CERZOS-UNS. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. Correspondencia a: jmmartinez@criba.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Las deficiencias de agua y nitrógeno (N) son los principales factores que limitan el crecimiento y rendimiento de los cereales en regiones semiáridas (Sinclair & Horie, 1989; Fageria & Baligar, 2005). La demanda global de fertilizantes nitrogenados se ha incrementado en los últimos 50 años (Scheepers & Raun, 2008; Hancock *et al.*, 2011), a la vez que han aumentado las aplicaciones en regiones con mayores limitantes hídricas. La principal característica que define a la zona semiárida es la escasez y errática de las precipitaciones. Además, gran parte de las precipitaciones tienen lugar durante el período de barbecho y mayormente no es utilizada por los cultivos (Quiroga *et al.*, 2003). En estas regiones es de gran importancia lograr la optimización en la aplicación de fertilizantes; sin embargo, es dificultoso debido a las condiciones mencionadas (Galantini *et al.*, 2000; López-Bellido & López-Bellido, 2001). Las aplicaciones deficientes de N producen ingresos menores y llevan a la sobreexplotación de los recursos, mientras que las aplicaciones excesivas aumentan los riesgos de pérdida de nutrientes. Los sistemas productivos sustentables deben ser eficientes en el uso de los insumos, para evitar estos peligros ambientales que conllevan la pérdida de N. Es por esto que se deberían adecuar las aplicaciones a las condiciones de fertilidad particulares y al potencial de rendimiento esperado. Según Cook & Veseth (1991), el límite de producción del cultivo está dado por la combinación del potencial genético y el ambiente en que se desarrolla. Campbell *et al.* (1993) informaron que hay una fuerte interacción entre el uso del agua y la respuesta de los cultivos a los fertilizantes en regiones semiáridas.

El cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) es la base de los sistemas productivos en una amplia región del sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (SOB) (Martínez *et al.*, 2012). Sus rendimientos son influenciados por las condiciones climáticas y las propiedades edáficas, lo que obliga a maximizar la eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno (Galantini *et al.*, 2004). Diferentes autores (Davis *et al.*, 2003; Dobermann, 2005; Fageria & Baligar, 2005) concuerdan en estimaciones de la eficiencia de recuperación del N aplicado en valores que oscilan entre 30 y 50%. Esto indica que aproximadamente más del 50% del N aplicado mediante fertilizantes no es asimilado por las plantas (Tilman *et al.*, 2002; Dobermann & Cassman, 2004). Es decir, se utiliza una pequeña parte del N que se aplica, con un gran costo económico y ambiental. En particular, la aplicación de N en estas regiones tiene una baja eficiencia por las pérdidas que se producen en los años lluviosos, donde el cultivo puede expresar su máximo potencial, y por el déficit que se genera en los años secos, en los que hay una demanda extra de agua que no puede ser satisfecha. El momento en que el N está disponible para el cultivo de trigo determina su absorción y su traslocación en la planta. Otros estudios (López-Bellido *et al.*, 2012) han demostrado que las aplicaciones particionadas, comparándolas con aplicaciones en un solo momento, han resultado en una mayor recuperación de N por la planta. Sin embargo, se debería ajustar para casos particulares teniendo en cuenta la fertilidad inicial del suelo (Recous & Machet, 1999). Una disponibilidad temprana se traduce en rendimientos mayores, mientras que en etapas tardías tiende a mejorar la calidad proteica del grano (Sarandón & Caldiz, 1990; Sarandón *et al.*, 2000). Igualmente el

momento de fertilización puede dar resultados distintos según las condiciones climáticas del año, la zona y los niveles de producción. Esto se debe a la interacción entre los factores edáficos, climáticos (Díaz-Zorita, 2000), de manejo y genotipo (Cox *et al.*, 1985; Sarandón & Caldiz, 1990), que hace que la relación entre disponibilidad de N y rendimiento sea compleja. Para el caso de aplicaciones pos-tergadas o tardías, y teniendo en cuenta la irregularidad de las precipitaciones, tienen la ventaja de poder realizarse en función de las características meteorológicas previas (cantidad de lluvia y biomasa del cultivo) y las expectativas futuras, sea el agua en el suelo como el pronóstico climático (Cantamutto *et al.*, 1986). Bono *et al.* (2000) encontraron respuesta a los diferentes momentos de aplicación del N; sin embargo, las aplicaciones al macollaje presentaron ventajas sobre las aplicaciones a la siembra. Lázari *et al.* (1991) observaron que cuando las lluvias durante el período de macollaje fueron escasas, el mayor aprovechamiento del N del fertilizante se produjo al aplicarlo a la siembra. Las aplicaciones tardías mejoraron la cantidad de N en grano, pero no así el rendimiento (Laurent *et al.*, 1996). Comparando aplicaciones a la siembra, fraccionada y al macollaje en Balcarce, Barrow y Bordenave (Pcia. de Buenos Aires), se encontró en todos los casos respuesta significativa a la fertilización, pero no entre momentos de aplicación (Loewy, 1990a; Bárbaro *et al.*, 1999). En el oeste bonaerense, con escasas lluvias invernales, la aplicación a la siembra produjo incrementos significativos respecto de las aplicaciones al macollaje (Díaz Zorita, 2000).

Debido a que en estas regiones, uno de los principales factores de producción es el agua proveniente de las precipitaciones, es dificultoso poder optimizar las diferentes eficiencias de N para reducir los costos y los problemas ambientales. Es por esto que la hipótesis planteada es que en el sudoeste bonaerense la aplicación de fertilizantes nitrogenados en macollaje, producen mayores rendimientos en ambientes caracterizados por déficits hídricos en momentos críticos del cultivo. Esto origina un aumento en la eficiencia del uso del N, ya quedando disponible en los períodos de máximos requerimientos del trigo y bajo condiciones favorables para la absorción por el cultivo.

El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la variabilidad climática en un sitio de la región semiárida de la provincia de Buenos Aires, Argentina, sobre la respuesta a diferentes dosis de N y momento de fertilización en la productividad del trigo y en la eficiencia en el uso del nitrógeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio, muestreo de suelo y plantas

Durante los años 2004, 2008, 2010, 2011 y 2012 se realizaron ensayos de fertilización nitrogenada en trigo, en distintos lotes de un establecimiento bajo siembra directa. Este sitio (38° 47' 14,8"S; 61° 39' 38,8"O) se encuentra ubicado en el sudoeste de la región semiárida bonaerense. Según la clasificación taxonómica (Soil Survey Staff, 2010) los suelos se clasifican como Argiustoles Típicos. Los lotes utilizados no poseían limitaciones físicas por presencia de horizontes petrocálcicos, con una profundidad efectiva de aproximadamente 60 cm. Los tratamientos surgieron de la combinación de un testigo sin fertilizar y tres niveles de fertilización con N (25, 50 y 100 kg ha⁻¹) aplicados en dos momentos: siembra (Ns) y macollaje (Nm). La fuente de N fue urea (46-0-0) aplicada al voleo en forma manual. El diseño experimental utilizado fue de 3 bloques completamente aleatorizados, con un total de 21 unidades experimentales. Las parcelas eran de 36 m², con 9 metros de largo y 4 metros de ancho. La fecha de siembra del trigo fue, en todos los años, durante la segunda quincena del mes de mayo, con una distancia entre hileras de 19 cm y a una profundidad de 5 cm. Se uso siempre la variedad *Buck Guapo* y el antecesor fue trigo para todos los casos. La necesidad teórica de agua por el cultivo de trigo (Paoloni & Vazquez, 1985) fue considerada igual para todos los años estudiados. Vale aclarar que estos autores estimaron esta necesidad a partir de la evapotranspiración potencial en trigo en las mismas regiones de donde se realizó este ensayo, y fue obtenida mediante la fórmula de Blaney y Criddle, adaptada por FAO para la región semiárida.

Análisis químicos y físicos del suelo

Se tomaron muestras de suelo para la caracterización del sitio de estudio. Estas fueron secadas al aire y tamizadas con una malla de 2 mm, y se determinaron las siguientes propiedades químicas: carbono orgánico (CO), método de combustión (1500°C) con analizador automático LECO C Analyser; nitrógeno total (Nt), método de Kjeldahl (Bremner, 1996), fósforo extraíble (Pe, Bray & Kurtz, 1945), y pH (relación suelo- agua 1:2,5). Se estimó el valor de MO considerando que un 58% de esta es C, utilizando un factor 1,72 (Galantini, 2005). Los datos analíticos de los suelos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Características edáficas del perfil del suelo (0-60 cm) de los años seleccionados al momento de la siembra del trigo.

| año | N inorgánico | | MO (g kg ⁻¹) | Nt (%) | Pe (mg kg ⁻¹) | pH |
|------|--------------|---------|-----------------------------|-----------|------------------------------|-----|
| | siembra | cosecha | | | | |
| 2004 | 97 | 17 | 23 | 1,3 | 24 | 6,1 |
| 2008 | 98 | 58 | 25 | 1,2 | 7 | 7,6 |
| 2010 | 81 | 23 | 24 | 1,3 | 26 | 7,4 |
| 2011 | 45 | 39 | 23 | 1,2 | 19 | 6,2 |
| 2012 | 83 | 55 | 24 | 1,2 | 26 | 6,0 |

N-NO₃, Nitrógeno de nitratos (kg ha⁻¹); MO, materia orgánica (%); Nt, porcentaje de nitrógeno total (%); Pe, Fósforo extraíble (mg kg⁻¹), pH, potencial Hidrógeno.

Simultáneamente se tomaron muestras de suelo a la siembra y cosecha en las profundidades de 0-20 y 20-60 cm, para conocer el contenido de N inorgánico del perfil de suelo por el método de arrastre de vapor (Bremner & Keeney, 1966).

Parámetros de rendimiento y componentes de calidad

En la cosecha se tomaron 2 m lineales de material vegetal (MS total aérea) para determinar la producción de grano y paja, así como el contenido de Nt (Bremner, 1996). Se contabilizaron las espigas por unidad de superficie (esp m⁻²) y los granos por espiga (g esp⁻¹). El peso de mil granos (P₁₀₀₀), se determinó con cinco replicas de 100 granos cada una, las cuales se promediaron y multiplicó por 10. La calidad (proteína, %) fue resultado de multiplicar el Nt del grano (%) por el factor 5,7 (Novoa & Loomis, 1981).

Eficiencias de nitrógeno

Para evaluar la eficiencia del uso se utilizaron las definiciones de diferentes autores (Raun & Johnson, 1999; Fageria & Baligar, 2005; Minoldo, 2010):

Eficiencia agronómica del fertilizante aplicado (EUF) para la producción de grano (g) o materia seca total aérea.

$$EUF_{MS} = (MS_f - MS_0) / N_f$$

$$EUF_g = (\text{grano}_f - \text{grano}_0) / N_f$$

La recuperación aparente del fertilizante aplicado (RAN)

$$RAN = (N - MS_f - N - MS_0) / N_f$$

Donde: MS, materia seca total aérea a cosecha (grano+ paja en kg ha⁻¹); grano, rendimiento en grano (kg ha⁻¹); f, tratamiento fertilizado; 0, tratamiento testigo; Nf, dosis de N del fertilizante.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos, se realizó ANAVA triple (año, dosis y momentos) y comparación de medias por el test de diferencias mínimas significativas. Cuando se detectó interacción con el año, se realizó un ANAVA doble entre dosis y momentos para cada uno de los años. Además, se realizaron correlaciones de Pearson entre rendimiento de MS y grano, los componentes de rendimiento y las eficiencias de N estudiadas, con respecto a las precipitaciones de setiembre (Prec. Set.), octubre (Prec. Oct.), noviembre (Prec. Nov.), primavera (Set-Oct-Nov) y precipitaciones de siembra a cosecha (ciclo completo), discriminado por momento de fertilización. Se utilizó para todos los análisis estadísticos el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el año 2004 las precipitaciones fueron acordes a las necesidades teóricas del trigo (Paoloni & Vázquez, 1985) para los periodos siembra-macollaje, macollaje-floración y floración-cosecha (Figura 1), con una frecuencia acumulada muy superior a la media histórica del sitio. En 2008 hubo marcados periodos secos durante todo el año, incrementándose aún más en los meses de primavera, con grandes déficits durante el período floración-cosecha. Durante 2010 las precipitaciones evidenciaron una alta variabilidad, concentrándose mayormente en el otoño y primavera, con un déficit hídrico severo en agosto. En 2011 se observó escasez de agua a partir de julio, que prosiguió de la misma manera hasta el fin del ciclo, acentuándose el déficit durante el período macollaje-floración con respecto a la necesidad del cultivo. En 2012 se observó una marcada sequía invernal y luego siguió una tendencia muy similar al año 2011, exceptuando lo ocurrido en el mes de agosto. En el 80% de los años (2008, 2010, 2011 y 2012) las precipitaciones durante el periodo macollaje-floración (fase vegetativa) y floración-cosecha (periodo de llenado de granos) fueron menores que las necesidades teóricas de agua del trigo, en concordancia a lo observado por Paoloni & Vázquez (1985).

Productividad del cultivo y calidad del grano

Se observaron diferentes respuestas para el rendimiento en MS, grano y proteína según el año estudiado (interacción significativa), por lo que se realizó el análisis por separado para cada uno de

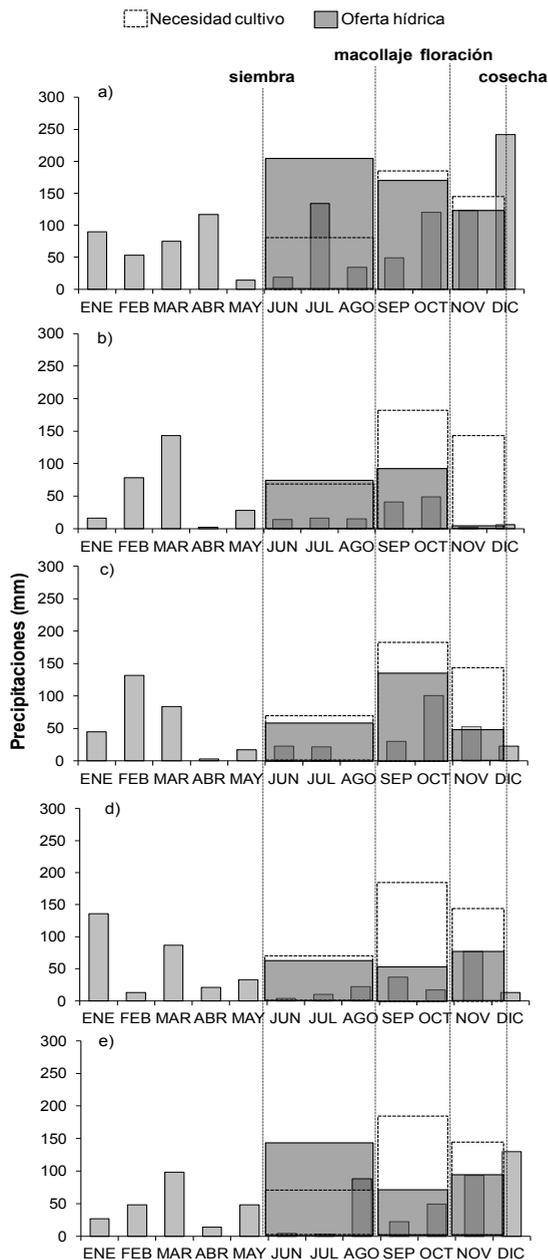


Figura 1. Precipitaciones mensuales registradas, oferta hídrica y necesidad teórica de agua del trigo por estadios para los años a) 2004, b) 2008, c) 2010, d) 2011 y e) 2012.

ellos (Tabla 2). Esto reflejó la variación interanual en las precipitaciones (Garrido-Lestache *et al.*, 2004) en este sitio, es decir, cambios en la distribución y en cantidad. En los años 2008 y 2011 se observaron diferentes valores de Pe y N inorgánico inicial, respectivamente; sin embargo, no se obser-

varon respuestas diferenciales de las dosis de N y momentos con respecto a los años con similares condiciones de fertilidad.

Para la producción de MS (grano y paja), en 2004 se observó interacción entre dosis y momentos ($p < 0,01$), por lo que al evaluar las dosis por cada uno de los momentos, con el N aplicado a la siembra, sólo se diferenció la dosis de 100 kg ha⁻¹. Sin embargo, con Nm se detectaron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre todas las dosis con respecto a la parcela sin aplicación, y se obtuvo la mayor respuesta con la mayor dosis aplicada.

En el año 2008 se observó nuevamente interacción significativa entre el momento y las dosis. En este caso se halló una respuesta significativa para las dosis aplicadas al momento de la siembra, y las mayores respuestas fueron para la dosis más alta. Caso contrario sucedió cuando se aplicó el N en el momento más tardío, donde se pudo observar claramente los retornos decrecientes, que evidenciaron diferencias significativas entre las dosis de 25 y 50 kg N ha⁻¹, con respecto al testigo y a la dosis máxima. La diferencia entre estos dos años se debió a las abundantes precipitaciones registradas durante 2004 que permitieron obtener rendimientos máximos con 100 kg N ha⁻¹ (Tabla 2), mientras que en 2008 se observó un marcado déficit hídrico en los meses de primavera, coincidente con el período de determinación del rendimiento (Miranda & Jorquera, 1994). Tanto para 2010, 2011 y 2012 se observaron diferencias significativas entre dosis, pero no así entre momentos. Para estos tres años, solo el tratamiento testigo se diferenció estadísticamente de los demás tratamientos con N.

Analizando la producción de grano en 2004 y 2008, se detectaron diferentes tendencias entre dosis y momentos (Tabla 2). En 2004 en Ns se observaron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre dosis, siendo: 100 > 50 ≥ 25 ≥ 0 kg N ha⁻¹. Para Nm se hallaron diferencias altamente significativas, y se obtuvo la máxima respuesta en grano para la dosis más elevada, tendencia similar a la encontrada con la MS. Con respecto a 2008, para Ns se hallaron menores diferencias entre dosis ($p < 0,01$), con diferencias de 25, 50 y 100 kg N ha⁻¹ respecto al tratamiento testigo, aunque no entre sí. Para las dosis aplicadas en macollaje, la significación fue menor ($p < 0,05$) y con el mayor rendimiento en la dosis de 50 kg N ha⁻¹ (Tabla 2).

En los años 2010 y 2012 se observó la misma tendencia que para la producción de MS (Tabla 2); mientras que en 2011 se hallaron mayores diferencias entre dosis, con la máxima producción de grano para las dosis de 50 y 100 kg N ha⁻¹. En Ver-

Tabla 2. Rendimientos en materia seca, grano y proteína por año y análisis de la varianza (ANAVA).

| Año | Componente | N ₀ | Ns | | | Nm | | | Media | | ANAVA | | |
|------|------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|---------------|-------|-----|-----|
| | | | 25 | 50 | 100 | 25 | 50 | 100 | Ns | Nm | D | M | DxM |
| 2004 | MS | 5756 | 6185 | 6615 | 9551 | 11.310 | 12.699 | 16.393 | 7450 | 13.467 | *** | *** | *** |
| | grano | 1932 | 2172 | 2413 | 3535 | 3535 | 3995 | 5165 | 2707 | 4232 | *** | *** | * |
| | proteína | 10,7 | 9,8 | 9,9 | 11,1 | 9,0 | 9,1 | 10,2 | 10,3 | 9,4 | ** | * | ns |
| 2008 | MS | 5394 | 6510 | 7077 | 8046 | 7049 | 7172 | 5766 | 7211 | 6662 | *** | ns | ** |
| | grano | 1848 | 2327 | 2482 | 2658 | 2494 | 2639 | 2106 | 2489 | 2413 | *** | ns | * |
| | proteína | 13,3 | 15,7 | 17,1 | 20,1 | 13,2 | 16,8 | 17,6 | 17,6 | 15,9 | *** | * | ns |
| 2010 | MS | 9390 | 11.555 | 10.806 | 11.830 | 10.386 | 10.587 | 11433 | 11.397 | 10.802 | ** | ns | ns |
| | grano | 2616 | 3550 | 3152 | 3242 | 3577 | 3350 | 3638 | 3315 | 3522 | ** | ns | ns |
| | proteína | 14,9 | 16,2 | 15,2 | 18,0 | 16,4 | 15,6 | 15,8 | 16,5 | 15,9 | ns | ns | ns |
| 2011 | MS | 3671 | 4447 | 3882 | 4987 | 4149 | 4789 | 4640 | 4439 | 4526 | ** | ns | ns |
| | grano | 920 | 1149 | 1278 | 1453 | 1332 | 1541 | 1470 | 1293 | 1447 | *** | ns | ns |
| | proteína | 12,6 | 12,7 | 12,6 | 14,1 | 13,1 | 13,9 | 15,0 | 13,1 | 14,0 | ns | ns | ns |
| 2012 | MS | 5632 | 6342 | 6368 | 7461 | 7303 | 7645 | 7053 | 6724 | 7333 | * | ns | ns |
| | grano | 1946 | 2207 | 2155 | 2286 | 2332 | 2306 | 1975 | 2216 | 2204 | ns | ns | ns |
| | proteína | 13,6 | 12,8 | 14,2 | 14,1 | 13,9 | 15,4 | 15,3 | 13,7 | 14,9 | ns | ns | ns |

Tratamientos, Ns, N aplicado a la siembra; Nm N aplicado al macollaje; N₀, tratamiento testigo; 25, 50 y 100 kg N ha⁻¹; MS, materia seca total aérea. ANAVA, análisis de la varianza; D, dosis; M, momento de aplicación. Los niveles de diferencias estadísticas significativas son indicados como: ns, no significativas; *, p<0,05; **, p<0,01 y ***, p<0,001.

tisoles de la región mediterránea de España, con condiciones climáticas semejantes a las de este estudio, López-Bellido *et al.* (1996) reportaron que el rendimiento en grano de trigo era influenciado por la dosis de N cuando las precipitaciones durante el ciclo de cultivo superaban los 450 mm. En este estudio sólo se encontró esa condición para el año 2004; sin embargo, y a pesar de la buena provisión inicial de N al momento de la siembra, se hallaron diferencias entre dosis en los años 2008, 2010 y 2011, aunque en este último el N inicial disponible fue más bajo (Tabla 1). Según lo informado por López-Bellido *et al.* (2001), la respuesta del trigo al N aplicado es también dependiente del N disponible del suelo.

En el contenido de proteína del grano no se encontró interacción significativa entre dosis y momentos (p>0,05). Para el año 2004, a pesar de que se registraron las precipitaciones más elevadas, se hallaron valores mayores y significativos con las dosis de 0 y 100 kg N ha⁻¹. Además, se observaron diferencias significativas entre momentos, y fue mayor el contenido proteico con dosis aplicadas a la siembra (Tabla 2). El valor promedio de proteína para este año fue bajo (\approx 10%), por debajo del estándar de comercialización del trigo pan, que establece un valor de proteína de 11%. Este bajo tenor proteico es un claro ejemplo del efecto de dilución ocasionado por el elevado rendimiento, en concordancia a lo hallado por otros trabajos (Loewy, 1990b; López-Bellido *et al.*, 2000; Garrido-Lestache *et al.*, 2004; Dupont *et al.*, 2006). En 2008 se detectaron diferencias significativas según mo-

mentos de fertilización a favor de la siembra, posiblemente atribuido a las escasas precipitaciones que se registraron desde agosto hasta el momento de cosecha. Esto es debido a que la proteína es muy dependiente de las condiciones de humedad del suelo y disponibilidad de N al momento de llenado del grano (Cox *et al.*, 1985). Gooding & Davies (1997) encontraron incrementos en el tenor proteico en condiciones de sequía o bajas precipitaciones, al igual que en este estudio. Especialmente los déficits durante el llenado de grano son de gran importancia en la removilización de N al grano, según lo informado por Angus & Fisher (1991). Aun así, los resultados de ambos años se contraponen a los hallados por otros autores (Karen *et al.*, 1994; Sowers *et al.*, 1994) que han reportado que la fertilización con N al macollaje aumenta la proteína. Analizando el efecto de dosis de N, se observaron respuestas significativas (p<0,001), con el máximo valor de proteína con la dosis de 100 kg N ha⁻¹ (Tabla 2).

En la comparación entre contenido proteico y rendimiento en grano para todos los años, no se observaron relaciones lineales e inversas promediando los dos momentos, en coincidencia a lo hallado por Garrido-Lestache *et al.* (2004). Estos autores sugirieron que la falta de relación era debida a la variación interanual en las precipitaciones en la región semiárida de España, coincidente con la variación en las precipitaciones detectadas en este estudio. Evans *et al.* (1975) informaron que estas variables no estaban linealmente relacionadas porque dependen de la dilución del almidón

que ocurre durante el llenado del grano, y en estos ambientes con condiciones climáticas variables pueden cambiar. Para los años restantes no se detectaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre momentos de fertilización respecto a la proteína. Esto coincide con lo hallado en estudios en el SOB por Ron & Loewy (2000), quienes observaron que en condiciones de primaveras con bajas precipitaciones la fertilización a la siembra aseguraba una mayor disponibilidad y absorción de N. En todos los casos (años) la dosis de 100 kg N ha⁻¹ mostró los mayores valores de N en grano con diferencias significativas respecto al testigo.

Componentes del rendimiento

El parámetro esp m⁻² mostró diferencias significativas entre las dosis de N, para el año 2008 (Tabla 3). En 2010 se observó la misma tendencia, además de las diferencias ya observadas según momentos ($p < 0,001$) de aplicación, y fue superior para Nm. Para los años 2011 y 2012 no se halló efecto de la dosis ($p > 0,05$) ni el momento de aplicación (Tabla 3).

Con respecto a los g esp⁻¹ se hallaron efectos significativos ($p < 0,05$) de las dosis para 2004, 2008 y 2011, sin ningún efecto del momento de aplicación para ningún año. El parámetro con menor variación fue el P₁₀₀₀, con diferencias entre los momentos de aplicación solamente en 2012. Cabe destacar que los componentes del rendimiento son

sensibles al momento del ciclo donde el cultivo pudo haber sufrido algún tipo de estrés, en este caso en particular, hídrico. Sin embargo, en este estudio la variabilidad en los resultados para todos los años no permitió observar una tendencia clara. Si el estrés hídrico ocurre en estadios tempranos, se reduce el número de granos por una mayor pérdida de macollos y pocos granos por espiguillas, mientras que en pos-antesis resultará en un menor peso de los granos (McDonald, 1989). En este estudio, a nivel general las escasas diferencias en los componentes entre momentos de fertilización se debieron a que durante el período macollaje-floración, en la mayoría de los años, se observaron déficits hídricos (Figura 1).

Eficiencia agronómica y recuperación aparente de N

Se observó una tendencia diferente (interacción significativa) entre los años de estudio en la EUF para MS como para grano y en la RAN, por lo tanto se analizó el efecto de las dosis de N y de los momentos de aplicación para cada año en particular.

La EUF demostró diferencias altamente significativas entre momentos de fertilización en 2004, tanto para MS como para grano (Tabla 4). En 2010 se observaron diferencias significativas con menor ajuste para la producción de MS, pero no así para grano; mientras que en 2011 las diferencias entre momentos sólo se observaron para rendimiento en

Tabla 3. Componentes de rendimiento según dosis y momentos para los años estudiados.

| Año | Componente | N ₀ | Ns | | | Nm | | | Media | | ANAVA | | |
|------|---------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|-------------|-------------|-------|-----|-----|
| | | | 25 | 50 | 100 | 25 | 50 | 100 | Ns | Nm | D | M | DxM |
| 2004 | esp m ⁻² | 429 | 372 | 316 | 363 | 494 | 613 | 716 | 350 | 608 | ns | *** | *** |
| | g esp ⁻¹ | 14 | 18 | 23 | 30 | 22 | 20 | 22 | 24 | 21 | *** | ns | * |
| | P ₁₀₀₀ | 40,1 | 40,7 | 41,4 | 41,6 | 41,5 | 41,5 | 41,5 | 41,2 | 41,5 | ns | ns | ns |
| 2008 | esp m ⁻² | 289 | 324 | 392 | 403 | 331 | 383 | 284 | 373 | 375 | ** | ns | ns |
| | g esp ⁻¹ | 19 | 22 | 19 | 20 | 23 | 21 | 22 | 20,3 | 20,7 | * | ns | ns |
| | P ₁₀₀₀ | 34,3 | 34,6 | 36,0 | 36,1 | 36,6 | 37,1 | 34,4 | 36 | 36 | ns | ns | ns |
| 2010 | esp m ⁻² | 364 | 419 | 410 | 420 | 514 | 516 | 474 | 416 | 448 | *** | *** | ns |
| | g esp ⁻¹ | 22 | 26 | 24 | 24 | 21 | 20 | 23 | 25 | 23 | ns | ns | ns |
| | P ₁₀₀₀ | 36,4 | 38,3 | 35,3 | 37,6 | 36,0 | 37,4 | 39,0 | 37,1 | 36,3 | ns | ns | ns |
| 2011 | esp m ⁻² | 218 | 179 | 182 | 196 | 199 | 239 | 228 | 186 | 192 | ns | ns | ns |
| | g esp ⁻¹ | 14 | 19 | 22 | 23 | 20 | 20 | 20 | 21 | 22 | * | ns | ns |
| | P ₁₀₀₀ | 34,0 | 31,8 | 33,8 | 32,6 | 34,0 | 36,2 | 31,9 | 32,7 | 33,5 | ns | ns | ns |
| 2012 | esp m ⁻² | 296 | 263 | 328 | 342 | 413 | 347 | 313 | 311 | 361 | ns | ns | ns |
| | g esp ⁻¹ | 20 | 19 | 20 | 28 | 23 | 20 | 18 | 22 | 24 | ns | ns | *** |
| | P ₁₀₀₀ | 35,3 | 33,1 | 33,5 | 30,9 | 38,3 | 37,6 | 37,9 | 32,5 | 34,2 | ns | *** | ns |

Tratamientos, Ns, N aplicado a la siembra; Nm N aplicado al macollaje; N₀, tratamiento testigo; 25, 50 y 100 kg N ha⁻¹; esp m⁻², número de espigas por m²; g esp⁻¹, granos por espiga; P₁₀₀₀, peso de mil granos (g). ANAVA, análisis de la varianza; D, dosis; M, momento de aplicación. Los niveles de diferencias estadísticas significativas son indicados como: ns, no significativas; *, $p < 0,05$; **, $p < 0,01$ y ***, $p < 0,001$.

Tabla 4. Eficiencias del uso del fertilizante (EUF) para MS y grano y recuperación aparente de nitrógeno (RAN) por año y dosis para el sitio de la región semiárida bonaerense.

| Dosis N | 2004 | | | 2008 | | | 2010 | | | 2011 | | | 2012 | | |
|-------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| | EUF | | RAN | EUF | | RAN | EUF | | RAN | EUF | | RAN | EUF | | RAN |
| | MS | g | | MS | g | | MS | g | | MS | g | | MS | g | |
| Ns ₂₅ | 39 | 18 | 14 | 47 | 26 | 73 | 12 | 37 | 150 | 26 | 9 | 46 | 24 | 10 | 23 |
| Ns ₅₀ | 42 | 15 | 25 | 34 | 16 | 74 | 28 | 11 | 33 | 7 | 7 | 11 | 15 | 7 | 37 |
| Ns ₁₀₀ | 38 | 16 | 38 | 27 | 3 | 74 | 24 | 6 | 57 | 13 | 5 | 20 | 18 | 3 | 30 |
| Nm ₂₅ | 222 | 64 | 104 | 66 | 37 | 71 | 40 | 38 | 208 | 19 | 16 | 61 | 67 | 19 | 93 |
| Nm ₅₀ | 139 | 41 | 76 | 36 | 11 | 36 | 24 | 15 | 87 | 22 | 12 | 47 | 40 | 7 | 53 |
| Nm ₁₀₀ | 106 | 32 | 76 | 12 | 6 | 43 | 20 | 10 | 75 | 10 | 5 | 25 | 14 | 1 | 20 |
| Ns | 40 | 17 | 26 | 36 | 13 | 73 | 55 | 18 | 80 | 15 | 7 | 26 | 19 | 7 | 30 |
| Nm | 156 | 46 | 85 | 38 | 15 | 62 | 28 | 21 | 123 | 17 | 11 | 45 | 40 | 9 | 56 |
| D | ns | ns | ns | *** | *** | ns | *** | *** | *** | ns | * | * | ns | ns | ns |
| M | *** | *** | *** | ns | ns | ns | ** | ns | * | ns | * | * | ns | ns | ns |
| DxM | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ** | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

EUF, Eficiencia del uso del fertilizante (kg de MS o grano (g) por kg de N aplicado); tratamientos Ns, N aplicado a la siembra; Nm N aplicado al macollaje; dosis N0, N25, N50, N100. RAN, recuperación aparente de N (fracción de N recuperada por la planta de la dosis aplicada, %). D, Dosis de N; M, momento de aplicación de N. Los niveles de diferencias estadísticas significativas son indicados como: ns, no significativas; *, p<0,05; **, p<0,01 y ***, p<0,001.

grano. En 2008 y 2012 no se detectaron diferencias entre los momentos de aplicación de fertilizante (Tabla 4). Con respecto a las dosis de N aplicadas se detectaron diferencias entre las EUF tanto de MS como grano para el año 2008 y 2010, aunque en 2011 estas diferencias sólo fueron encontradas en la EUF_g con menor significación (p<0,05). En la fertilización al macollaje, coincidiendo con otros trabajos (Simmons, 1987; López-Bellido & López-Bellido, 2001; Galantini *et al.*, 2006), se observó un descenso de la EUF con el aumento de las dosis de N. En cambio, con las aplicaciones al momento de la siembra sólo se observó esta tendencia para los años 2008 y 2010. Respecto a los valores de EUF_g por momento de aplicación, promedio de los años 2008, 2011 y 2012, éstos coincidieron con los citados por Ron & Loewy (2000) para la zona de Bordenave. En 2004 y 2010 los valores fueron superiores debido a los elevados rendimientos para esas campañas. En el sudeste bonaerense, con abundantes lluvias invernales y con diferentes sistemas de labranzas, las aplicaciones al macollaje fueron más eficientes que las de la siembra (Melaj *et al.*, 2003). En estas situaciones, el N al macollaje permitió una mayor recuperación del fertilizante aplicado. Otros autores (Videla *et al.*, 1996) encontraron que la eficiencia del N en macollaje fue mayor como consecuencia de una mayor absorción hasta antesis. Por otro lado, García *et al.* (1998) encontraron eficiencias iguales o mayores con aplicaciones a la siembra o divididas que en macollaje, si bien las diferencias fueron significativas en 4 de 10 ensayos realizados.

Con respecto a la RAN, se observaron efectos

variables según el año, en coincidencia a lo hallado por López-Bellido & López-Bellido (2001). Se encontraron diferencias significativas por momentos de fertilización en 2004, 2010 y 2011. En la mayoría de los años, a excepción del 2008, los valores de RAN en la aplicación tardía superaron a los de la siembra (por encima del 60%), en concordancia a lo hallado por Sarandón *et al.* (1997) y Melaj *et al.* (2000), quienes trabajaron en condiciones sin limitante hídrica. Una excepción fue lo ocurrido en 2010, ya que los valores de RAN superaron a los citados. Los periodos de alta temperatura y baja humedad durante el llenado del grano reducen la eficiencia de la removilización y absorción de N proveniente del suelo pos-antesis (Melaj *et al.*, 2003). Vale aclarar, que el término "aparente" resulta de considerar que la aplicación del fertilizante en el suelo puede afectar las transformaciones del nutriente en el suelo (Minoldo, 2010), por lo que esta metodología asume que los procesos de mineralización-inmovilización y otras transformaciones de N son similares en las parcelas fertilizadas y en los testigos (Rao *et al.*, 1992). En general, los valores hallados de RAN, a excepción del año 2010, se situaron en rangos reportados por la bibliografía (Novoa & Loomis, 1981; Minoldo, 2010), es decir, entre un 10 y 90% del fertilizante aplicado (Tabla 4). En cambio, en 2010 para los dos momentos y en 2004 con Nm, con la dosis de 25 kg N ha⁻¹, se hallaron valores muy elevados, por encima del 100% producido probablemente por un *priming effect* (Jenkinson *et al.*, 1985). Esto es, las plantas fertilizadas con N pueden absorber más N del suelo, sea por un mejor desarrollo radical o por una mayor descomposición de las fracciones or-

gánicas lábiles después de fertilizar (León *et al.*, 1995). Según Jenkinson *et al.* (1985) el origen de este proceso es diverso, aunque los valores obtenidos en este estudio fueron diferentes a los de la bibliografía. Igualmente, este efecto sólo hallado con las dosis de N más bajas, donde los valores fueron muy superiores a los demás tratamientos, coincide con lo informado por Raun *et al.* (1998) en ensayos de largo plazo con trigo en Molisoles. Sin embargo, estos autores reportaron valores de RAN que no superaron el 100%, contrariamente a lo hallado en este trabajo.

Entre las posibles causas que podrían explicar este fenómeno, se encuentra la oferta hídrica para 2004 y 2010, que luego de la aplicación de N al macollaje fue muy similar a la necesidad teórica del cultivo de trigo para estas regiones. Esto puede haber favorecido la mineralización de N del suelo debido a la mayor disponibilidad hídrica, sumado a las mejores condiciones durante los meses primaverales. Mientras que en 2010, está asociado al cultivo antecesor, debido a que las sequías severas durante el año 2009 no permitieron un gran aporte de residuos de cosecha del antecesor para el próximo año. Es por esto que con la dosis de N se puede haber producido una estimulación de los

microorganismos del suelo que favorecieron una mayor mineralización del N, ya que la inmovilización fue inexistente debido al escaso o nulo aporte de residuos.

Influencia de las precipitaciones

Cuando se evaluaron las dosis de N aplicadas al macollaje, las precipitaciones de octubre mostraron correlaciones significativas para todos los parámetros analizados, a excepción de $g\ esp^{-1}$ (Tabla 5). Con el rendimiento en MS y grano se observaron correlaciones altamente significativas ($p < 0,001$) con las lluvias de octubre para Ns y Nm, con mayor valor de correlación para este último, lo que demuestra la importancia de estas precipitaciones en el cultivo de trigo en esta región. Con Nm se obtuvieron correlaciones altamente significativas con las precipitaciones del ciclo completo. En las aplicaciones a la siembra, sólo el parámetro P_{1000} mostró correlaciones altamente significativas ($p < 0,001$), sin dejar de lado las precipitaciones de todo el ciclo. Esto se debe a que el trigo con estrés hídrico tiene un período de llenado de grano más corto, ya que las lluvias de este período son funda-

Tabla 5. Correlación del rendimiento y sus componentes con las precipitaciones, para todos los tratamientos y por momentos de aplicación.

| Momento de aplicación | Variables | n | Prec. Set. | Prec. Oct. | Prec. Nov. | Set-Oct-Nov | Prec. Ciclo completo |
|---|---------------------|----|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Coeficiente de correlación de Pearson (r) | | | | | | | |
| Ns | Rend. MS | 60 | -0,14 ^{ns} | 0,62 ^{***} | -0,18 ^{ns} | -0,29 [*] | 0,16 ^{ns} |
| | Rend. Grano | | -0,02 ^{ns} | 0,69 ^{***} | -0,12 ^{ns} | -0,09 ^{ns} | 0,31 [*] |
| | Proteínas | | -0,30 [*] | -0,20 ^{ns} | -0,56 ^{***} | -0,74 ^{***} | -0,60 ^{***} |
| | esp m ⁻² | | 0,10 ^{ns} | 0,67 ^{***} | -0,14 ^{ns} | 0,0021 ^{ns} | 0,36 ^{**} |
| | g esp ⁻¹ | | -0,12 ^{ns} | 0,22 ^{ns} | 0,06 ^{ns} | -0,05 ^{ns} | 0,11 ^{ns} |
| | P ₁₀₀₀ | | 0,60 ^{***} | 0,83 ^{***} | 0,03 ^{ns} | 0,52 ^{***} | 0,76 ^{***} |
| | EUF _{MS} | 36 | 0,18 ^{ns} | 0,49 ^{***} | -0,24 ^{ns} | -0,09 ^{ns} | 0,19 ^{ns} |
| Nm | EUF _g | | 0,23 ^{ns} | 0,45 ^{***} | -0,2 ^{ns} | -0,01 ^{ns} | 0,22 ^{ns} |
| | RAN | | -0,005 ^{ns} | 0,12 ^{ns} | -0,52 ^{***} | -0,48 ^{**} | -0,27 ^{ns} |
| | Rend. MS | 60 | 0,22 ^{ns} | 0,79 ^{***} | 0,14 ^{ns} | 0,32 [*] | 0,64 ^{***} |
| | Rend. Grano | | 0,26 [*] | 0,77 ^{***} | 0,07 ^{ns} | 0,29 [*] | 0,60 ^{***} |
| | Proteínas | | -0,53 ^{***} | -0,38 ^{**} | -0,38 ^{**} | -0,78 ^{***} | -0,70 ^{***} |
| | esp m ⁻² | | 0,47 ^{**} | 0,56 ^{***} | 0,11 ^{ns} | 0,39 ^{**} | 0,60 ^{***} |
| | g esp ⁻¹ | | -0,09 ^{ns} | 0,06 ^{ns} | -0,18 ^{ns} | -0,22 ^{ns} | -0,11 ^{ns} |
| P ₁₀₀₀ | P ₁₀₀₀ | | 0,45 ^{**} | 0,52 ^{***} | 0,28 ^{ns} | 0,66 ^{***} | 0,69 ^{***} |
| | EUF _{MS} | 36 | 0,45 ^{***} | 0,52 ^{***} | 0,28 ^{ns} | 0,66 ^{***} | 0,70 ^{***} |
| | EUF _g | | 0,43 ^{**} | 0,55 ^{***} | 0,14 ^{ns} | 0,49 ^{***} | 0,60 ^{***} |
| | RAN | | 0,02 ^{ns} | 0,41 ^{**} | -0,08 ^{ns} | -0,08 ^{ns} | 0,17 ^{ns} |

EUF, Eficiencia del uso del fertilizante (kg de MS o grano por kg de N aplicado); tratamientos (s), N aplicado a la siembra; (m) N aplicado al macollaje; EUN, eficiencia del uso del N (kg MS o grano por kg N disponible); RAN, recuperación aparente de N (kg de N recuperados de la dosis aplicada de N). Precipitaciones del mes de setiembre (Prec. Set.), octubre (Prec. Oct.), noviembre (Prec. Nov.), primavera (Set-Oct-Nov) y desde siembra a cosecha (Prec. ciclo completo)

Los niveles de correlaciones estadísticamente significativas son indicadas como: ^{ns}, no significativas; ^{*}, $p < 0,05$; ^{**}, $p < 0,01$ y ^{***}, $p < 0,001$.

mentales para la correcta traslocación de fotoasimilados hacia el grano (López-Bellido *et al.*, 1996; Galantini *et al.*, 2000).

Respecto a la proteína del grano, se observó una relación altamente significativa ($p < 0,001$) e inversa de las precipitaciones, tanto de primavera como del ciclo de cultivo, para las dosis a la siembra y las de macollaje (Tabla 5). Estos resultados ya fueron informados por Garrido-Lestache *et al.* (2005), quienes encontraron una relación similar con las precipitaciones de ciclo completo en trigo candeal (*Triticum durum* L.) para la zona mediterránea de España. Esto se produjo debido a que cuanto mayor sean las precipitaciones, mayor será el período de llenado de grano si no existe alguna otra limitante, lo que removiliza una mayor cantidad de fotoasimilados hacia el grano con la consecuente reducción de la proteína.

En la fertilización al macollaje, la eficiencia del N tanto en MS como en grano, mostró correlaciones significativas siguiendo el orden: Prec. Ciclo completo > Prec. primavera > Prec. Oct > Prec. Set. (Tabla 5). Caso contrario sucedió con las dosis a la siembra, donde se hallaron relaciones inversas y negativas sólo con las precipitaciones de octubre. En contraposición a lo hallado en este trabajo, Diaz-Zorita (2000) informó que en el SOB las EUF de Nm son más dependientes de las precipitaciones de setiembre. La RAN para las dosis de N a la siembra mostró relaciones significativas e inversas con Prec. Nov. y las precipitaciones registradas en primavera, con r de $-0,52$ ($p < 0,001$) y $-0,48$ ($p < 0,01$), respectivamente. En cambio, para el N aplicado en macollaje sólo se hallaron correlaciones positivas con las precipitaciones de Octubre (Tabla 5).

CONCLUSIONES

Las precipitaciones de primavera tienen influencia en el rendimiento cuando la fertilización se realiza en macollaje, principalmente las precipitaciones ocurridas en octubre.

El efecto del año en estos ambientes semiáridos reviste gran importancia ya que puede determinar el éxito o fracaso de la fertilización nitrogenada, acentuando las pérdidas económicas y los problemas ambientales. Las mayores EUF en macollaje no son suficientes para contrarrestar el mayor gasto de realizar la fertilización fuera del momento de la siembra, salvo en años climáticos con precipitaciones elevadas en donde se justifica esta práctica.

En este ambiente, el principal problema de la

producción es la falta de agua en momentos críticos del cultivo, lo que reduce el efecto del N como factor principal de producción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los productores de la Regional Bahía Blanca de AAPRESID, en particular a Javier Irastorza, propietario del establecimiento donde se realizó la experiencia, y a Profertil S.A.

BIBLIOGRAFÍA

- Angus, J.F. and R.A. Fisher, 1991. Grain and protein responses to nitrogen applied to wheat growing on a red earth. *Australian Journal of Agricultural Research* 42:735-746.
- Bárbaro, N.; M. López, S. Melaj, R. Bergh; H. Echeverría y T. Loewy, 1999. Influencia del momento de aplicación en la eficiencia de fertilización nitrogenada en cultivos de trigo. *Actas del XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Pucón, Chile.
- Bono, A.; J.C. Montoya y F.J. Babinec, 2000. Dosis y momentos de fertilización en trigo en la Región semiárida Pampeana. *XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina.
- Bray, R. and L. Kurtz, 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science* 59:39-45.
- Bremner, J.M., 1996. Nitrogen total. In: *Methods of soil analysis. Part 3: Chemical Methods*; Sparks, DL. (Eds.) SSSA. Madison WI, 1085-1123.
- Bremner, J. and D. Keeney, 1966. Determination and isotoperatio analysis of 10 different forms of nitrogen in soil: 3. Exchangeable ammonium, nitrate and 11 nitrite by extraction-distillation methods. *Soil Science Society of American Proceedings* 30:577-582.
- Campbell, C.A.; R.P. Zentner, F. Selles, B.G. McConkey and F.B. Dyck, 1993. Nitrogen management for spring wheat grown annually on zero-tillage: yield and nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal* 85:107-114.
- Cantamutto, M.A.; F. Mockel, R. Rosell, R. Martínez, M.R. Landriscini, L. Gallez y G. Gullace, 1986. Factores que condicionan la respuesta del trigo a la fertilización con nitrógeno y fósforo en el sur de la provincia de Bs.As. *Actas XI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Neuquen, Argentina.
- Cook, R.J. and R.J. Veseth, 1991. *Wheat Health Management*. APS Press, St. Paul, Minnesota, 152 pp.
- Cox, M.C.; C.O. Qualset and D.W. Rains, 1985. Genetic variation for N assimilation and translocation in wheat. II. Nitrogen assimilation in relation to grain yield and

- protein. *Crop Science* 25:435-440.
- Davis R.L.; J.J. Patton and R.K. Teal, 2003. Nitrogen balance in the Magruder Plots following 109 years in continuous winter wheat. *Journal of Plant Nutrition* 26:1561-1580.
- Di Rienzo, J.A.; F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González, M. Tablada y C.W. Robledo. 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Diaz Zorita, M., 2000. Momento de aplicaciones de urea para aumentar la producción de grano de trigo en el oeste bonaerense. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Dobermann, A., 2005. Nitrogen use efficiency-State of the art. In "Proceedings of the International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers", Frankfurt, Germany. International Fertilizer Industry Association, Paris (CD-ROM).
- Dobermann, A. and K.G. Cassman, 2004. Environmental dimensions of fertilizer nitrogen: What can be done to increase nitrogen use efficiency and ensure global food security?. En *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment*. A. R. Mosier, J. K. Syers, and J. R. Freney, (Eds.). Paris, France, pp. 261-278.
- Dupont, F.M.; W.J. Hurkman, W.H. Vensel, C. Tanaka, K.M. Kothari, O.K. Chung and S.B. Altenbach, 2006. Protein accumulation and composition in wheat grains: effects of mineral nutrients and high temperature. *European Journal of Agronomy* 25(2):96-107.
- Evans, L.T.; I.F. Wardlaw and R.A. Fischer, 1975. Wheat. In: Evans LT (Eds) *Crop physiology, some case histories*. Cambridge Univ. Press, pp 105-149.
- Fageria N.K. and V.C. Baligar, 2005. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Advances in Agronomy*:97-185.
- Galantini, J., 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Marban, L. *et al.* (Eds). *Información y Tecnología en los Laboratorios de Suelos para el Desarrollo Agropecuario Sostenible*. Asociación Argentina de Ciencia del Suelo, pp. 103-114.
- Galantini, J.A.; M.R. Landriscini, J.O. Iglesias, A.M. Migliarina and R.A. Rosell, 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina: 2. Nutrient balance, yield and grain quality. *Soil and Tillage Research* 53:137-144.
- Galantini, J.A.; R. Fernández, G. Minoldo, M.R. Landriscini, R. Kiessling y R. Rosell, 2004. Fertilización del trigo con N y S en suelos bajo siembra directa del S y SO Bonaerense. *Actas VI Congreso Nacional de Trigo*. UNS-INTA (Eds.). Bahía Blanca, 141pp.
- Galantini J.A.; M.R. Landriscini, R. Fernández, G. Minoldo, J. Cacchiarelli y J.O. Iglesias, 2006. Trigo: Fertilización con nitrógeno y azufre en el sur y sudoeste bonaerense. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, INPOFOS 2006 23-25.
- García, F.O.; K.P. Fabrizzi, A. Bernardo y F. Justel, 1998. Fertilización nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense: respuesta, fuentes y momentos de aplicación. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Carlos Paz, Córdoba.
- Garrido-Lestache, E.; R.J. López-Bellido and L. López-Bellido, 2004. Effect of N rate, timing and splitting and N type on bread-making quality in hard red spring wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 85(2):213-236.
- Garrido-Lestache, E.; R.J. López-Bellido and L. López-Bellido, 2005. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *European Journal of Agronomy* 23:265-278.
- Gooding, M.J. and W.P. Davies, 1997. *Wheat Production and Utilization*. Editorial Cab International, Wallingford, Inglaterra, 355 pp.
- Hancock, J.M.; A.M. McNeill, G.K. McDonald and R.E. Holloway, 2011. Fate of fertilizer N applied to wheat on a coarse textured highly calcareous soil under simulated semi-arid conditions. *Plant and Soil* 348: 139-153.
- Jenkinson, D.S., R. Fox and J.H. Rayner, 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen- the so called 'priming effect'. *Soil Science* 36(3):425-444.
- Karen, E.S.; C.M. Baird and L.P. William, 1994. Optimizing yield and grain protein in soft white winter wheat with split nitrogen applications. *Agronomy Journal* 86:1020-1025.
- Laurent, G.; J. Ferrari, M. Lazzari y R. Victoria, 1996. Balance del nitrógeno del fertilizante aplicado al trigo en dos épocas diferentes. *Ciencia del Suelo* 14:7-11.
- Lazzari, A.; G. Laurent y R. Victoria, 1991. Destino del ¹⁵N del fertilizante aplicado al trigo durante dos años consecutivos, en condiciones semiáridas. *Suelo y Planta* 1:179-188.
- Léon, M., P. Lainé, A. Ourry and J. Boucaud, 1995. Increased uptake of native soil nitrogen by roots of *Lolium multiflorum* Lam. after nitrogen fertilization is explained by a stimulation of the uptake process itself. *Plant and Soil*, 173:197-203.
- Loewy, T., 1990a. Fertilización nitrogenada del trigo en el Sudoeste bonaerense. I. Respuesta física y diagnóstica. *Ciencia del Suelo* 8:47-56.
- Loewy, T., 1990b. Efecto simple y combinado del N sobre el trigo, en tres épocas de aplicación. *Ciencia del Suelo* 8:181-186.
- López-Bellido, L.; M. Fuentes, J.E. Castillo, F.J. López-Garrido and E.J. Fernández, 1996. Long-term tillage,

- crop rotation, and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under Mediterranean conditions. *Agronomy Journal* 88:783-791.
- López-Bellido, L.; R.J. López-Bellido, J.E. Castillo and F.J. López-Bellido, 2000. Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal* 92:1054-1063.
- López-Bellido, R.J. and L. López-Bellido, 2001. Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: effect of tillage, crop rotation and N fertilization. *Field Crops Research* 71:31-46.
- López-Bellido, L.; R.J. López-Bellido, J.E. Castillo and F.J. López-Bellido, 2001. Effects of long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on bread-making quality of hard red spring wheat. *Field Crops Research* 72:197-210.
- López-Bellido, L.; V. Muñoz-Romero, J. Benítez-Vega, P. Fernández-García, R. Redondo and R.J. López-Bellido, 2012. Wheat response to nitrogen splitting applied to a Vertisols in different tillage systems and cropping rotations under typical Mediterranean climatic conditions. *European Journal of Agronomy* 43:24-32.
- Martínez, J.M.; M.R. Landriscini, J.A. Galantini y M. Duval, 2012. Eficiencias de nitrógeno para trigo en suelos del sudoeste bonaerense. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Trabajo completo en CD-ROM. Mar del Plata, Argentina.
- McDonald, G.K., 1989. The contribution of nitrogen fertilizer to the nitrogen nutrition of rainfed wheat crops in Australia: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 29:455-481.
- Melaj, M.A.; H.E. Echeverría, G.A. Studdert, F.H. Andrade, N.O. Bárbaro y S.C. López, 2000. Acumulación y partición de nitrógeno en el cultivo de trigo en función del sistema de labranza y momento de fertilización nitrogenada. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Melaj, M.A.; H.E. Echeverría, S.C. López, G. Studdert, F. Andrade and N.O. Bárbaro, 2003. Timing of N fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Agronomy Journal* 95:1525-1531.
- Minoldo, G., 2010. Impacto de largo plazo de diferentes secuencias de cultivos del sudoeste bonaerense sobre algunas propiedades químicas del suelo y la productividad del trigo. Tesis de Maestría, Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, 153 pp.
- Miranda, R. y A.J. Jorquera, 1994. Rendimiento del trigo y precipitaciones. I: Campo experimental. III Congreso Nacional de Trigo. Bahía Blanca, Argentina.
- Novoa, R. and R.S. Loomis, 1981. Nitrogen and plant production. *Plant and Soil* 58:177-204.
- Paoloni, J.D. y R. Vazquez, 1985. Necesidades teóricas de los cereales de invierno y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones como base para el balance hídrico. *Anales de Edafología y Agrobiología XLIV:1545-1556*.
- Quiroga A.; D. Funaro y O. Ormeño, 2003. Aspectos del manejo del agua del suelo para el cultivo de trigo. En *Trigo actualización 2003*, INTA Anguil, Boletín Técnico 76:33-44.
- Rao, A.C.S., J.L. Smith, J.F. Parr and R.I. Papendick, 1992. Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods. *Fertilizer Research* 33:209-217.
- Raun, W.R.; G.V. Johnson, S.B. Phillips and R.L. Westerman, 1998. Effect of long-term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma. *Soil and Tillage Research* 47:323-330.
- Raun W.R. and G.V. Johnson, 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal* 3:357-363.
- Recous, S. and J.M. Machet, 1999. Short-term immobilization and crop uptake of fertilizer nitrogen applied to winter wheat: effect of date of application in spring. *Plant and Soil* 206:137-149.
- Ron, M. y T. Loewy, 2000. Factores de eficiencia del N aplicado en trigo, a la siembra o macollaje. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Sarandón, S.J. and D.O. Caldiz, 1990. Effects of varying N supply at different growth stages on N uptake and nitrogen partitioning efficiency in two wheat cultivars. *Fertilizer Research* 22: 21-27.
- Sarandón, S.J.; S. Golik y H.O. Chidichimo, 1997. Acumulación y partición del nitrógeno en dos cultivares de trigo pan ante la fertilización nitrogenada en siembra directa y convencional. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 102:175-186.
- Sarandón, S.; M. Zuluaga y S. Golik, 2000. Rendimiento, acumulación y partición del N en 2 cultivares de trigo según el momento de aplicación y tipo de fertilizante utilizado. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Schepers, T.S. and W.A. Raun, 2008. Nitrogen in Agricultural Systems. *Agronomy. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA. Monograph No. 49*.
- Simmons, A.D., 1987. Studies on nitrogen use efficiency in cereals. In: Jenkinson D.S. y K.A. Smith (Eds.) *Nitrogen Efficiency in Agricultural Soils*. Elsevier Science. pp. 110-124.
- Sinclair, T.R. and T. Horie, 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a re-

- view. *Crop Science* 29:90-98.
- Soil Survey Staff, 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th Ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, 374 pp.
- Sowers, K.E.; B.C. Miller and W.L. Pan, 1994. Optimizing yield and grain protein in soft white winter wheat with split nitrogen applications. *Agronomy Journal* 86:1020-1025.
- Tilman, D.; K.G. Cassman, P.A. Matson, R.L. Naylor and S. Polasky, 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671-677.
- Videla, C.; J.L. Ferrari, H.E. Echeverría y M.I. Travasso, 1996. Transformaciones del nitrógeno en el cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 14:1-6.