

Respuesta a la Fertilización con Azufre en Trigo Pan

Introducción

El azufre (S) es un constituyente de aminoácidos precursores de proteínas y otros compuestos esenciales con funciones específicas en las plantas. Es un nutriente requerido en cantidad relativamente grande por los cultivos. Un trigo de 5000 kg /ha con 12 % de proteína en el grano extrae en promedio 11 kg. de S/ha. Pero mientras que fertilizar con nitrógeno (N) y fósforo (P) es una práctica corriente en el cultivo de trigo, la aplicación de S ha dependido tradicionalmente de la cantidad del nutriente que contenga el fertilizante usado para suministrar los anteriores.

Cuando el superfosfato simple (11-13 % de S) era la fuente de P más utilizada proveía considerable cantidad de S para los cultivos. En la actualidad, el uso de fuentes de P más concentradas o de formulaciones binarias con concentraciones muy bajas de S no constituye un aporte significativo. Este hecho sumado al mayor requerimiento de S de cultivos de alto potencial de rendimiento manejados con la tecnología actualmente disponible aumenta la probabilidad de encontrar situaciones en las que el S pueda limitar el crecimiento del cultivo e interaccionar con la respuesta a otros nutrientes.

Un cultivo deficiente en S produce menos granos y de menor tamaño. A su vez en trigo, puede haber un efecto negativo sobre la calidad de la harina para panificación. La síntesis de proteínas deficientes en S reduce la formación de enlaces S-S fundamentales para la polimerización de proteínas del gluten de las que depende la resistencia y la elasticidad de la masa (Wall, 1971; Moss et al., 1981).

La deficiencia de S en cultivos ha sido reportada en muchas partes del mundo desde hace décadas (Messick et al., 1992; Tisdale et al., 1986). Recientemente en Argentina, varios trabajos mencionan efecto significativo del S sobre el rendimiento de trigo en un número considerable de casos (Melgar et al, 1998; Ventimiglia, et al. 1999).

En Uruguay un relevamiento del contenido de S en cultivos de maíz en suelos de uso agrícola intensivo, similares en propiedades a los del área triguera demostró que en un 30 % de los casos el S estaba por debajo del límite inferior del rango óptimo y en otro 30 %, muy cercano a ese límite (Morón Baethgen,

1996). Morón y Risso (2001) encontraron respuesta al agregado de S en trébol blanco en suelos negros sobre basalto en el norte de Uruguay. Pero la información local respecto a la respuesta de cultivos al S es escasa.

Con esta información en mente se inició este trabajo que tiene el objetivo principal de explorar la probabilidad de encontrar deficiencia de S para el cultivo de trigo en suelos típicos de la región y estudiar el impacto que tendría en el rendimiento en grano y/o en la calidad la corrección de este nutriente.

Materiales y Métodos

El trabajo se inició en 1998 en la Estación Experimental La Estanzuela, INIA Uruguay. La mayor parte de los experimentos se instaló en Brunosoles Eutricos (Molisoles) de textura franco-arcillo-limosa y pH moderadamente ácido.

Previo a la siembra del cultivo se tomaron muestras del sitio en el horizonte superficial (0-20 cm) para caracterizar algunas propiedades del suelo y definir la necesidad de fertilización con N y P (cuadro 1). El potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) se determinó por incubación anaeróbica, considerándose bajos los valores inferiores a 30 y altos los superiores a 55-60 mg N-NH₄/ kg (Morón & Sawchik, 1998). El S-SO₄ fue determinado por extracción con fosfato monocálcico y determinación por turbidimetría con sulfato de bario.

Mientras que el P fue corregido sobre la base del análisis de suelo como para que no fuese limitante, la fertilización con N se manejó con un criterio diferente. En algunos casos se aplicó al cultivo la cantidad de N que usaría un agricultor en una situación similar, fertilización frecuentemente subóptima y comúnmente fraccionada entre siembra e inicio del encañado. En otros, se fertilizó a la siembra con una cantidad de N basada en el dato de nitrato en el suelo e historia de la chacra y se refertilizó al cultivo al inicio del encañado con la cantidad de N necesaria para obtener el óptimo económico estimada en base al análisis foliar a Z30 (fin del macollaje) (García Lamothe A., datos sin publicar).

Entre 1998 y el 2001 se instalaron 20 experimentos. En un grupo de ellos (T4) se evaluó la aplicación de 3 niveles de S como sulfato de calcio: 0, 25 y 50 kg S / ha (años 1998 y 2001) o, 0, 12,5 y 25 kg S / ha (años 1999-2000) aplicado a Z30-31 (fin de macollaje), o fraccionado entre siembra y Z30-31 (2001). A

su vez se estudió el efecto de la interacción entre la fertilización con S y la respuesta al N aplicado a floración, práctica recomendada para mejorar la calidad del grano. Se usó un diseño de parcelas divididas donde la parcela principal la constituyó el tratamiento con S (un control y 2 dosis) y la subparcela los niveles de N (un control y 3 dosis). Los tratamientos se agruparon en bloques con 3 repeticiones y el área cosechada fue de 10 m².

En otro grupo de experimentos (T3) se evaluó 2 tratamientos: el control sin S *versus* la aplicación de 25 o 50 kg de S/ha según el año, también aplicado a Z30-31 como sulfato de calcio, o fraccionado entre siembra e inicio del encañado (año 2001). En estos casos se estudió el efecto de la interacción de la fertilización con S con aplicaciones complementarias de micronutrientes (Zn, Cu, B, Mo) seleccionados por su probabilidad de deficiencia en base a su contenido en el suelo, historia previa, o condiciones del año, y/o requerimiento del cultivo. Los tratamientos con micronutrientes se sortearon en las subparcelas. También en este caso se dispusieron en 3 bloques y el área cosechada fue 10 m².

En el año 2001 se instalaron dos ensayos adicionales (T), uno con un cultivar de buen potencial de rendimiento y calidad panadera, y otro de mayor potencial (7 ton/ha en el 2000) pero de pobre calidad. En éstos experimentos se estudió la respuesta a S bajo 2 niveles de fertilización con N, un testigo tecnológico (60 kg de N/ha) y un tratamiento con N no limitante (180 kg de N/ha), los que constituyeron la parcela principal. El N se aplicó 30 kg a la siembra y el resto a Z30-31. Las subparcelas consistieron en los tratamientos de S: 0, 15, 30 y 45 kg S /ha aplicado como sulfato de calcio, 15 kg de S/ha a la instalación del experimento y el resto a Z30-31 junto con el N (urea).

Cuadro 1. Algunas características edáficas (0-20 cm) y culturales de los sitios experimentales .

Año	Sitio exp.	Cultivo anterior	Laboreo	pH (agua)	C org (%)	P Bray I mg / kg	N-NO3 mg / kg	PMN N-NH ₄ mg / kg	S-S04 mg / kg
1998	A	Trigo-Trojo	Convencional	5.8	1.90	21.6	9.0		ND
	B	Maíz p/silo	Convencional	5.7	2.15	30.0	5.4		ND
	C	Maíz	SD†	5.6	2.10	21.8	7.4		ND
1999	E	Raigrás.	SD††	5.7	1.92	13.7	6.7		5.5
	F	Barbecho	Convencional	6.2	2.12	19.9	14		4.0
	G	Girasol	Convencional	5.6	2.15	11.5	5.5		6.0
	H	Girasol	SD†	5.5	2.12	25.8	6.9	27	7.0
2000	I	Pradera vieja	SD ††	5.2	1.99	14.5	11.2	18	0.0
	Ch43	Barbecho	Convencional	5.4	1.64	19.0	9.5	23	22.0
	Cmt	Alfalfa	Convencional	5.3	2.09	22.0	11.4	22	10.4
2001	J	Pradera	SD ††	5.9	2.66	35.2	17.4	16	9.1
	K	Sudán	SD †	5.7	2.09	32.2	7.1	27	6.0
	Kbis	Girasol	SD †	5.6	2.11	23.8	7.1	22	4.4
	L	Maíz/silo	SD ††	6.0	2.05	10.6	7.4	35	6.8
	M	Festuca	Convencional	5.6	1.84	17.0	14.0	11	5.3

† sistema de rotación de cultivos con siembra directa (SD) desde 1994

†† con SD en un sistema manejado con laboreo convencional

ND: no determinado; el sulfato en el suelo se analizó a partir de 1999 cuando el laboratorio de la estación experimental ajustó la técnica.

Cuadro 2. Cultivar, largo del ciclo, fecha de siembra, fertilización con N para cada experimento

Año	Exp.Tipo/ sitio.	Cultivar	Largo Ciclo†	Fecha de siembra	N†† (kg/ha)
1998	T4 / A	I. Cardenal o	I	24-junio	30-60
	T4 / B	I. Mirlo	I-C	26-junio	30-60
	T3 / A	I. Cardenal	I	24-junio	30-90-30*
	T3 / B	I. Mirlo	I-C	26-junio	30-90-30*
	T3 / C	I. Mirlo	I-C	25-junio	30-90-30*
1999	T4 / F	I. Caburé	I	17-junio	20-40
	T4 / FN	I. Caburé	I	17-junio	20-0
	T4 / H	I. Mirlo	I-C	30-julio	30-70
	T3 / G	I. Mirlo	I-C	4-agosto	0-60
	T3 / E	I. Tijereta	L	27-mayo	60-60-30
2000	T4 / I	I. Gorrión	L	24-mayo	30-30
	T3 / I	I. Gorrión	L	24-mayo	30-60-30
	T3 / cMT	I. Mirlo	I-C	21-julio	40-80
	T3 / Ch43	I. Pelón	I	27-julio	30-60-30
2001	T4 / J	I. Gorrión	L	9-junio	30-30
	T4 / K	I. Gorrión	L	11-junio	30-30
	T4 / Kbis	I. Caburé	I	2-julio	30-30
	T4 / -L	Le 2271	L	17-junio	30-30
	T / M	Mirlo	I-C	26-junio	30-150
	T / M	Le 2265	I	26-junio	30-150

† largo del ciclo I = intermedio; I-C = intermedio a corto; L = largo

†† Momento de aplicación del N: Instalación del experimento -Z30-31 - floración (Z65-67)

El análisis estadístico de los datos se hizo mediante el procedimiento GLM del programa SAS para parcelas divididas, y la separación de medias por MDS. El mismo procedimiento se utilizó para el ajuste de la curvas de respuesta en experimentos T-M del 2001.

Resultados

Producción de biomasa al final del encañado (Z38-39)

En 8 de 20 experimentos se determinó diferencia en producción de materia seca (MS) hacia el fin del encañado (Z38) atribuible al agregado de S (cuadro 3). En 2 casos el efecto fue muy marcado (4 FN, 4 I), observándose una respuesta de hasta 50 kg de MS por kg de S agregado; en los otros casos el efecto fue de menor magnitud.

Cuadro 3. Producción de materia seca a Z38-39 y lecturas de clorofila en los experimentos conducidos en La Estanzuela entre 1998 y 2001

Tipo exp.- sitio/año	Control s/S		12.5 kg/ha		25 kg/ha		50 kg/ha	
	MS kg/ha	SPAD	MS kg/ha	SPAD	MS kg/ha	SPAD	MS kg/ha	SPAD
T3-A/98	3264	38.6	-	-	-	-	2958	38.0
T3-B/98	2345	39.0	-	-	-	-	2574	38.68
T3-C/98	2457	37.6	-	-	-	-	2652	37.1
T3- G/99	1558	38.5	-	-	1744	39.9	-	-
T3- E/99	5392	39.6	-	-	5687	39.6	-	-
T3- I/00	9619	41.9	-	-	8758	42.7	-	-
T3- cMT/00	7232	39.4	7260	40.0	-	-	-	-
T3- Ch43/00	3630	35.8	-	-	3730	35.00	-	-
T3-cMT/01	7415	37.6	-	-	7132	37.9	-	-
T4 A/98	4133	39.3	4904	38.7	4910	41.40	-	-
T4 B/98	1753	36.4	1955	35.8	2260	37.8	-	-
T4-F-99	4033	33.97	4000	34.35	4035	34.65	-	-
T4-FN/99	2763	32.7	3578	34.5	4198	34.0	-	-
T4-H/99	3733	40.0	3595	39.4	3390	40.7	-	-
T4-I/00	8511	40.6	8774	41.5	9744	42.1	-	-
T4-J/01	8659	36.9	-	-	6755	28.7	6794	28.4
T4-K/01	5200	36.8	-	-	5804	37.0	5582	36.6
T4-Kbis/01	5166	38.0	-	-	5523	37.3	5614	38.1
T4-L/01	4471	38.9	-	-	5039	38.4	4430	38.0

También se observó diferencia en color entre tratamientos medido con un medidor de clorofila manual Minolta (model SPAD 502) atribuible al S, un síntoma que tendió a atenuarse a medida que transcurrió el ciclo del cultivo.

Rendimiento en grano

Sólo en 5 de 20 experimentos la fertilización con S afectó significativamente el rendimiento en grano ($P < 0.10$) (cuadro 4). En 4 de ellos este efecto fue positivo. En cambio en el 4-L la dosis de 25 kg de S/ha provocó una caída del rendimiento en tanto que con 50 kg de S/ha éste se mantuvo similar al del testigo sin S. En otros 4 experimentos se observó una tendencia del S a incrementar la producción de grano ($P < 0.20$).

El % de incremento en rendimiento varió entre 6 y 10 %, con una eficiencia que osciló entre 4 a 28 kg de grano por kg de S agregado.

Cuadro 4. Experimento (Exp.), cultivar, rendimiento promedio (Rend. ξ), porcentaje de proteína del control sin S (%Ptr), significación estadística del efecto del S sobre el rendimiento, kg de grano/ha para cada dosis de S y máximo % de incremento en rendimiento (% \blacktriangle rend.).

Año	Exp.	Cultivar	Rend.8 (kg/ha)	%Ptr	Efecto S Pr>F	Dosis S (kg/ha)				(% \blacktriangle) rend
						0	12.5	25	50	
1998	T4- A	I. Cardenal	5650	11.0	0.75	5700 a	-	5760 a	5480 a	
	T4- B	I. Mirlo	4380	11.8	0.21	4300 a	-	4400 a	4430 a	
	T3 A	I. Cardenal	5550	11.6	0.89	5560 a	-	-	5540 a	
	T3 B	I. Mirlo	4790	12.6	0.03	4700 b	-	-	4880 a	4%
	T3 C	I. Mirlo	3640	9.4	0.12	3550 a			3720 a	5%
1999	T4 F	I. Caburé	3870	11.2	0.14	3660 a	3820 a	4180 a	-	14%
	T4 FN	I. Caburé	3720	10.7	0.04	3510 b	3920 a	3700 ab		6%
	T4 H	I. Mirlo	2820	12.2	0.84	2790 a	2860 a	2790 a		
	T3 G	I. Mirlo	2370	11.9	0.04	2260 b		2480 a		10%
	T3 E	I. Tijereta	4090	12.7	0.64	4070 a	-	4110 a	-	
2000	T4 I	I. Gorrión	3980	11.8	0.07	3875 b	4230 a	3960 ab		9%
	T3-I	I. Gorrión	3940	12.1	0.51	3900 a		3990 a		
	T3 CMT	I. Mirlo	5230	14.0	0.52	5330 a		5210 a		
	T3 K	I. Pelón	3150	12.4	0.47	3380 a		3050 a		
2001	T4- J	I. Gorrión	3300		0.63	3340a		3380a	3160a	
	T4- K	I. Gorrión	3420		0.19	2270ab		2400a	2330ab	5.7%
	T4-Kbis	I. Caburé	2334		0.91	3440		3385	3390	
	T4-L	Le 2271	3440		0.04	3631a		3192 b	3562 a	-
	KgS/ha					0	15	30	45	
T- M	Mirlo*	2942	13.6	0.15	2900	2873	3070	2930	6%	
T- M	LE 2265*	2736*	12.6	0.55	2670	2740	2870	2700		

Para cada experimento los valores seguidos de la misma letra no difieren estadísticamente entre sí ($P \leq 0.10$)

**** importante ataque de Fusarium***

En los experimentos T-M del 2001, no hubo respuesta significativa al S. Los cultivos fueron afectados por una ataque severo de fusarium que bien pudo enmascarar cualquier tipo de respuesta. No obstante, en I. Mirlo, el cultivar menos atacado por la enfermedad, se vio una tendencia del S a incrementar el rendimiento (6%) hasta la aplicación de casi 30 kg de S/ha, siendo ésta respuesta más consistente cuando la aplicación 180 kg de N/ha.

Interacción de la fertilización con S con la aplicación de N a floración o de micronutrientes

Los tratamientos de N a floración tuvieron poco o ningún efecto sobre el rendimiento en grano ya que la aplicación tan tardía, prácticamente no modificó aquellos componentes del rendimiento que definen al número de granos. Tampoco hubo interacción entre las variables consideradas excepto por un caso (4I) en el que hubo respuesta positiva al N aplicado a floración, ésta fue más eficiente con dosis crecientes de S (cuadro 5).

Sólo en un experimento el tratamiento con micronutrientes afectó el rendimiento en grano (3C), y en otros 2 casos se observó una tendencia ($P < 0.15$) de algún tratamientos (v.g. Zn y Mo) a incrementarlo, pero el efecto no dependió de la aplicación de S en ningún caso.

Efecto del S sobre la concentración de nitrógeno (% de N) en el grano

La fertilización con S no afectó el % de N en el grano excepto en un experimento (4FN). En este caso con la dosis más alta de S se verificó un incremento significativo ($P < 0.10$) de la concentración de N en el grano. La dosis de 12.5 kg de S/ha había incrementado la producción de grano sin casi modificar el % de N del mismo, pero cuando se aplicó 25 kg de S/ha cayó el rendimiento por menor tamaño de grano y subió el % de N del grano (cuadro 5).

Cuadro 5. Significación estadística del efecto del S sobre el porcentaje de N en el grano, de la interacción S x N a floración (SxNt) y S x micronutrientes (SxMicro), porcentaje de N en el control sin S (%N C), máximo valor obtenido (Mx.%N).

Año	Exp.	Cultivar	Resp. S Pr>F	SxNt Pr>F	SxMicro Pr>F	%N C	Mx.%N
1998	T4- A	I. Cardenal o	0.70	0.76		1.95	1.95
	T4 B	I. Mirlo	0.20	0.02		2.15	2.15
	T3 A	I. Cardenal	0.89		0.11	2.04	2.04
	T3 B	I. Mirlo	0.35		0.29	2.23	2.23
	T3 C	I. Mirlo	0.89		0.75	1.86	1.86
1999	T4 F	I. Caburé	0.29	0.92		1.96	1.97
	T4 FN	I. Caburé	0.09	0.61		1.88	1.94
	T4 H	I. Mirlo	0.61	0.41		2.11	2.12
	T3 G	I. Mirlo	0.15		0.81	2.15	2.15
	T3 E	I. Tijereta	0.46		0.24	2.24	2.24
2000	T4 I	I. Gorrión	0.30	0.06		2.08	2.10
	T3-I	I. Gorrión	0.28		0.26	2.16	2.19
	T3 CMT	I. Mirlo	0.65		0.75	2.67	2.67
	3 K	I. Pelón	0.83		0.70	2.10	2.13
2001	T4- J	I. Gorrión					
	T4- K	I. Gorrión					
	T4- Kbis	I. Caburé					
	4-L	Le 2271					
	T- M	Mirlo	0.38	0.12		2.35	2.35
	T- M	LE 2265	0.25	0.93		2.19	2.43

En la mayoría de los casos el % de N en el grano se mantuvo similar al determinado en el tratamiento control sin S, o bien tendió a bajar con la aplicación de S (cuadro 5), excepto en el 2001 con la LE 2265, donde tendió a incrementar. En este experimento no hubo aplicaciones tardías (floración) con N.

Aunque en casi la totalidad de los experimentos T4 la fertilización con N a floración incrementó la concentración de N en el grano, sólo en 2 casos (4B y 4I) la interacción entre el N tardío y la fertilización con S fue significativa ($P < 10\%$). En el primero, hubo incremento en rendimiento con el N a floración cuando no se aplicó S, mientras que en el otro caso, en tratamientos sin S la respuesta al N tardío se observó hasta 20 kg de N/ha, mientras que en los fertilizados con S continuó hasta 30 kg de N/ha

En los experimentos T-M del 2001 de respuesta a S en dos situaciones de disponibilidad de N, el efecto del primero sobre la proteína del grano no fue significativo, pero con el cultivar I. Mirlo se vio una tendencia del S a incrementar el % de proteína del grano más consistente cuando se aplicó 180 kg de N/ha durante el ciclo del cultivo.

En los experimentos T3, los tratamientos con micronutrientes no afectaron el % de N del grano, ni se determinó efecto significativo de la interacción del S con estos tratamientos. Sólo en un caso (3 A) se observó una tendencia ($P=0.11$) en este sentido. La concentración de N en el grano bajó cuando se fertilizó con S y no se aplicaron micronutrientes, en cambio se mantuvo cuando se aplicaron algunas combinaciones de éstos (v.g. Mo y Zn).

Discusión

Producción de biomasa a Zadoks 38-39 (fin del encañado)

Las diferencias en color y en producción de materia seca determinadas entre tratamientos con y sin S a fin del encañado son indicativos de deficiencia del nutriente en etapas tempranas del crecimiento del trigo.

Cuando el S es deficiente la síntesis de proteínas es inhibida, cae el contenido de clorofila causando un amarillamiento (clorosis) similar al que ocurre cuando el N es deficiente, con la diferencia que en el caso del S es más notorio en las hojas nuevas.

El valor relativamente bajo de sulfato en el suelo en la mayoría de los sitios experimentales en dónde se midió permitía pronosticar algún tipo de respuesta en crecimiento del cultivo al agregado de S. En Nueva Zelanda en suelos bajo pasturas un valor menor a 6 mg S-SO₄/ kg es considerado deficiente y se recomienda fertilizar con S (Edmeades. et. al, 1994). Messick(1992) indica que 10 mg S-SO₄/ kg es el nivel crítico para encontrar respuesta a S en cultivos de buen potencial de rendimiento.

El contenido de sulfato en el horizonte superficial del suelo puede no obstante ser una herramienta poco precisa para pronosticar la respuesta a S porque como el nitrato, es soluble y móvil en el suelo, y condiciones por ejemplo, de excesiva pluviosidad pueden lavarlo del perfil, hecho que debe tenerse presente, pero el sulfato lavado puede ser retenido en forma disponible en capas más profundas del suelo.

Rendimiento en grano

El hecho que el efecto del S sobre la producción de biomasa al encañado no se tradujera en mayor rendimiento en grano en varios experimentos (T3) pudo deberse en algunos casos, a que el nivel de S aplicado fue excesivo. Esta

hipótesis se basa en resultados de 1998 en experimentos T4 dónde el S tuvo efecto positivo cuando se aplicó 25 kg/ha pero nulo o negativo con el doble de dosis. Morón y Risso (2001) también tuvieron efecto depresivo cuando se aumentó la dosis de 25 kg S/ha a 50 kg S/ha en trébol blanco

Es posible que niveles altos de S induzcan deficiencia en Mo y una reducción de la síntesis proteica afectando el rendimiento y la calidad del grano (Marschener, 1986). El Mo es constituyente de la encima que controla la reducción del nitrato, un proceso imprescindible para la incorporación de N a compuestos orgánicos.

Ese año (1998) las parcelas con S en los experimentos T3 se fertilizaron con 50 kg de S/ha, dosis recomendada en Alemania para trigo (Haneklaus et al., 1992) pero que parece excesiva para nuestras condiciones y cultivos de rendimiento menor a 5000 kg/ha.

Teniendo presente que el rendimiento y por lo tanto la necesidad de S no fue muy alta en ninguno de los experimentos otra hipótesis manejable es que la ausencia de respuesta en algunos casos pudo deberse a que si bien la disponibilidad del nutriente fue inicialmente baja, incrementó en etapas posteriores de la estación de crecimiento logrando satisfacer los requerimientos del cultivo.

La disponibilidad de S depende de la capacidad de aporte del suelo y de la planta de tomarlo, pues la contribución de S de la atmósfera en zonas rurales puede considerarse insignificante. La planta absorbe el S como ion sulfato, que llega a las raíces por difusión o por flujo de masa (disuelto en el agua). El sulfato en solución y el adsorbido al suelo representa la fracción de S que el cultivo puede utilizar durante su ciclo de crecimiento.

La mayor disponibilidad de S a medida que avanza la estación de crecimiento puede en parte responder al incremento en la tasa de liberación del nutriente de residuos orgánicos frescos. El proceso es favorecido por la temperatura y la presencia de plantas y ambos incrementan con el desarrollo del cultivo.

Por otro lado a medida que el sistema radicular crece la planta puede acceder a sulfato retenido en capas más profundas del suelo. Este mecanismo explicaría porque la respuesta a S no estuvo tan asociada a la obtención de alto rendimiento como podía esperarse, e incluso hubo espuesta con rendimiento

menor a 2500 kg/ha en un sitio con restricción física para la penetración de raíces en el perfil del suelo (G) .

Los rendimientos más altos se obtuvieron comúnmente, en suelos con buena condición física donde es posible un mejor crecimiento de las raíces y mayor acceso a S respecto a aquellos de pobre estructura, o mala preparación del suelo. Tampoco se encontró respuesta a S en los experimentos instalados en sistemas estabilizados con siembra directa, aún cuando el contenido de sulfato en la capa de 0-20 cm de suelo fuera bajo e independientemente del rastrojo y su manejo. La existencia de canales naturales a través de los cuales pueden penetrar las raíces en profundidad parece ser una explicación razonable en estas situaciones.

En el caso en el que se determinó respuesta negativa al S (4L) con la dosis de 25 kg de S/ha ésta pudo deberse a inmovilización del S agregado del fertilizante ya que cuando se incrementó la dosis el efecto negativo desapareció. La mineralización de residuos orgánicos es acompañada por incremento en la biomasa microbiana del suelo. La tasa de aumento del carbono microbiano es notable a partir del inicio del encañado (García y Morón, 1992), y si los residuos tienen alta relación C/S los microorganismos pueden utilizar S del fertilizante reduciendo transitoriamente su disponibilidad. El sitio en particular había tenido maíz el verano anterior y cero laboreo.

El subsuelo de los suelos más representativos de la región tiene un Bt enriquecido en arcilla, y óxidos de hierro, fracciones importantes para la retención S-SO₄ adsorbido. En consecuencia cuando este ion es lavado de la superficie del suelo por excesos hídricos puede ser acumulado en forma disponible en el subsuelo y contribuir significativamente a la nutrición del cultivo si no hay impedimento para la penetración de las raíces en ese horizonte (v.g. compactación).

En este sentido una adecuada fertilización con N puede aliviar la deficiencia de S si favorece el crecimiento de raíces hacia zonas más ricas en sulfato. Esto podría explicar los resultados de los experimentos del sitio F en 1999 e I el año siguiente. La respuesta a S fue más consistente cuando la disponibilidad de N fue escasa pero tendió a disminuir con mayor disponibilidad.

Cabe acotar que la estación de crecimiento en 1999 fue muy seca y la deficiencia de agua en el horizonte superficial tiende a promover un

crecimiento más profundo de las raíces en busca de humedad. A su vez, cuando el rendimiento del cultivo está limitado por la falta de agua los requerimientos de S no pueden ser muy altos.

En el sitio B (1998) se observó la situación inversa, el trigo respondió más al S cuando tuvo más N disponible. En este caso el efecto de la fertilización con N sobre la producción de biomasa y en consecuencia sobre la demanda de S fue aparentemente mayor que el impacto sobre el desarrollo radicular y el acceso a mayor disponibilidad de S.

Cuando se fertiliza con N y no hay otra limitante para el crecimiento, el cultivo absorbe más N del suelo y aunque también toma más S no necesariamente lo hace en igual proporción, ya sea por escasez de sulfato en el suelo y/o por la existencia de algún impedimento para acceder a él (v.g. suela de arado).

Efecto del cultivo anterior (residuos frescos) y/o el laboreo

Cuatro de los experimentos en dónde se determinó respuesta significativa al S tenían en común el escaso o nulo aporte de residuos frescos de cultivos anteriores (cuadro 1). En 2 casos se trató de un maíz que se ensiló (3B y 4L), en otro, el suelo había quedado en barbecho por un tiempo prolongado (F). El cuarto sitio (G), si bien tuvo girasol el verano previo, el cultivo fue desparejo y de bajo rendimiento, además la preparación de la chacra fue mala y se hizo tarde, muy próxima a la siembra.

La importancia del tipo y cantidad de residuo dejado por el cultivo anterior sobre la respuesta a S radica en que el suministro del nutriente depende en gran parte de su liberación de la fracción orgánica. El S del humus es muy estable y de liberación lenta, pero el S de los residuos vegetales puede ser liberado rápidamente durante el ciclo del cultivo y la tasa de liberación depende de la relación C/S que poseen, como sucede con el N.

En el sitio I, el trigo se sembró luego de una pradera mixta de 3 años engramillada (*Cynodon dactylon*) y con la leguminosa constituyendo una reducida proporción de la misma. Además, como no se laboreó el suelo para la siembra es presumible que la descomposición de los residuos haya sido lenta, incluso pudiendo darse inmovilización del nutriente durante los primeros meses, lo que explicaría los niveles de sulfato hallados, 0 ppm en el horizonte superficial y 2.5 ppm en la capa de 20-40cm (cuadro 1.).

Eficiencia de la fertilización con S

El porcentaje de incremento en rendimiento logrado a través de la fertilización con S varió entre 4 y 10 %. En experimentos conducidos sobre argiudoles de la región pampeana norte, Provincia de Buenos Aires y Santa Fe, Melgar et. al. (1998) determinaron incrementos de 6 a 8 % similares a los de este trabajo, pero en aquellas localidades fue más frecuente encontrar respuesta al nutriente con valores de sulfato similares en el suelo.

El efecto del S sobre el rendimiento estuvo más relacionado a un aumento en el peso de los granos que en el número de granos quizás debido a que cuando se fertilizó con S en la mayoría de los casos (inicio del encañado) el número de granos por unidad de área estaba prácticamente definido. En 3 situaciones (3 G, 4 I y 4L) el efecto del S sobre el peso de los granos fue estadísticamente significativo ($P \leq 0.10$).

Una aplicación más temprana de S podría resultar más ventajosa si a través de ella se lograra aumentar el número de granos y un mayor impacto sobre el rendimiento. Sin embargo, Melgar et. al, (1998) aplicó sulfato de amonio 15 a 30 días previo a la siembra y el efecto sobre el rendimiento no fue mayor que en estos casos (6% en promedio).

Debe tenerse presente que si el S se agrega como sulfato a la siembra en etapas tempranas del cultivo puede quedar expuesto a pérdidas por lavado o gaseosas. El nitrato se sabe que sufre estas pérdidas reduciendo la eficiencia de la fertilización aún en suelos de textura relativamente fina como los de INIA-La Estanzuela cuando ocurren excesos de agua en el suelo frecuentes en otoño e invierno, cuando la absorción de nutrientes por el cultivo es escasa..

Se determinó una eficiencia de la fertilización entre 4 y 28 kg de grano por kg de S agregado. Los valores obtenidos son bastante variables, los más bajos son similares a los reportados por Melgar et al 1998, pero Vitamiglia et al. (1999)

en un suelo de textura más arenosa y menor contenido de materia orgánica reporta valores de 35 kg de grano/kg de S con 15 kg de S/ha.

Considerando una relación insumo producto de 8 sólo en 2 de los 5 casos con respuesta significativa al S hubiera resultado económico fertilizar con el nutriente. Sin embargo, si el S se aplica junto con otro nutriente como el P o el N esta relación puede bajar a aproximadamente la mitad o menos y entonces hubiera sido rentable aplicar S en la mayoría de los casos en que hubo respuesta positiva y significativa al nutriente. Cabe acotar que dónde sólo se determinó una tendencia del S a incrementar el rendimiento, la exigencia del diseño utilizado (parcela dividida) y el bajo número de repeticiones (3) pudo ser la causa de que el efecto no fuera estadísticamente significativo.

La respuesta a S en rendimiento en grano no fue lineal, las dosis altas en general mostraron un efecto negativo, pero al no tener curvas de respuesta significativas con al menos 4 niveles de S no se puede concluir respecto a la eficiencia, ni calcular la dosis óptima para cada caso. La inclusión en el 2001 de los experimentos con 4 niveles de S se hizo con este propósito. Lamentablemente sólo en de ellos se observó una tendencia del S a incrementar el rendimiento en grano ($P=0.15$), y en ese caso el máximo físico se alcanzó con 15 kg de S/ha.

No obstante las limitaciones de este trabajo, los resultados sugieren que para rendimientos de trigo dentro del rango de los obtenidos una aplicación de S de 12,5 a 25 kg/ha sería suficiente para asegurar una buena disponibilidad para el cultivo cuando diversos factores hagan pensar en deficiencia del nutriente. Esta es una cantidad razonable de S si se considera que la extracción aproximada del nutriente por un cultivo de 5 ton/ha es 11 kg/ha, como se mencionó anteriormente, y si se asume una eficiencia de la fertilización similar a la del N (50 %).

Respuesta del S sobre el % de N en el grano

La asimilación tardía de N depende de la disponibilidad de S por lo que sería esperable mayor acumulación de N en plantas sin deficiencia. Sin embargo la deficiencia en S no pareció limitar la translocación de N al grano en estos experimentos. Sólo en uno de ellos (4FN) se observó incremento en el % de N atribuible al S ($P\leq 0.10$), y por el contrario en la mitad de los casos el % de N en el grano tendió a caer con la aplicación de S probablemente por efecto de dilución.

En algunos casos (experimentos T4) estos resultados podrían atribuirse al efecto de prolongación la duración del área foliar que se logra a través del N aplicado a floración, hecho que permitiría un uso más eficiente del S asimilado ya que su movilidad en la planta es controlada por la tasa de muerte de tejidos inducida por deficiencia de N (Marschener, 1986).

La inhibición de la síntesis proteica por deficiencia de S provoca acumulación de compuestos de N solubles por lo que parte de N determinado en el grano puede no estar en forma de proteína. Por consiguiente se determinó también el gluten pero tampoco este parámetro fue afectado por el S, aunque frecuentemente se observó una tendencia negativa consistente con determinada para el % de N. En el caso en que se verificó un aumento del % de N en el grano (4FN) por efecto del S el aumento en gluten no fue significativo.

En resumen en la mayoría de los experimentos ni la concentración de N en el grano, ni el gluten, parámetros usados como indicadores de calidad del grano en la industria molinera, fueron beneficiados por la fertilización con S, sino que, por el contrario, el efecto tendió a ser negativo. Sin embargo en algunos casos tendió a mejorar la relación P/L (alveograma de Chopin) pero el efecto fue muy leve y variable según el cultivar (datos no publicados).

Conclusiones

En suelos de fertilidad y textura media como los Brunosoles (Molisoles) de La Estanzuela, suelos promedio de la región litoral sur del Uruguay y del área triguera, el S puede llegar a ser un factor limitante del crecimiento del cultivo y del rendimiento en grano aunque la probabilidad es relativamente baja.

La manera más adecuada para pronosticar la deficiencia de S en este tipo de suelo debería considerar por un lado, el potencial de rendimiento del cultivo en cuestión (requerimientos de S) y por otro, factores que afectan su disponibilidad en el suelo: el cultivo previo, manejo de residuos, profundidad de arraigamiento, laboreo de la chacra, el grado de erosión de la misma, entre otros.

El contenido de sulfato en el suelo, aunque depende de las condiciones ambientales, puede ser un indicador del potencial de mineralización de S del

suelo y por lo tanto una herramienta útil para ayudar a pronosticar la deficiencia del nutriente. Atendiendo al hecho de la posible contribución para la nutrición del cultivo del sulfato de capas sub-superficiales del suelo parece recomendable tomar muestras a profundidades mayor a los 0-20 cm.

La respuesta a S en trigo es más probable que ocurra en sistemas de producción extractiva donde se retire gran parte de los residuos de los cultivos, o cuando se realice una mala preparación del suelo o exista alguna limitante para el desarrollo de las raíces en profundidad, (v.g. problemas texturales causados por erosión, excesivo laboreo, etc.) y más aún, cuando a las condiciones previas se suma una alta fertilización con N que aumente significativamente la biomasa y los requerimientos de S del cultivo. En cambio en sistemas con siembra directa estabilizados su deficiencia parece menos probable lo que puede deberse al menos en parte, a una exploración más profunda de las raíces.

En base a los resultados obtenidos en este trabajo la recomendación de S para un cultivo de trigo de rendimiento igual o inferior a 5 ton no debería superar los 25 kg de S/ha.

En cuanto a la concentración de proteína del grano en general no fue incrementada por la fertilización con S. El efecto sobre la calidad de la proteína no fue claro, ni consistente por lo que no se presentó la información en los resultados. En algunos casos se obtuvo alguna mejora en el gluten índice y/o en la relación P/L (alveograma) con la aplicación de S cuando a través de la aplicación de N a floración se logró un incremento en la cantidad de proteína del grano, pero el efecto dependió del cultivar (García Lamothe ,1999).

Respecto al beneficio económico de ésta práctica de manejo puede concluirse que si bien no tiene el impacto de la fertilización con N puede resultar interesante en situaciones con alta probabilidad de respuesta, si el S aplicado proviene de un fertilizante como el sulfato de amonio que además provee de N al cultivo, o como el superfosfato simple utilizado para corregir el P, ya que no implicaría un costo de aplicación adicional, y reduciría el costo por unidad de S.

Citas bibliográficas

Edmeades D.C., S.F. Ledgard, C.C.Boswell, A.G. Sinclair, A. Ghani, A.C. Graithwaite, J.H. Watkinson, B.S. Thorrold, M.W. Brown . 1994. Some recent Developments in Sulphur Research in New Zealand Agriculture. Sulphur in Agriculture 18:3-7.

García Lamothe, A. y A. Morón. 1992. Estudios de C, N y P en la biomasa microbiana del suelo en 3 sistemas de rotación agrícola. In Rev. INIA Inv. Agr. N1671, Tomo I, 111-126, diciembre 1992.

García Lamothe, A. 1999. Impacto de la fertilización con N y otros nutrientes sobre la calidad del grano de trigo pan. Primer Jornada sobre rendimiento y calidad de trigo. Mesa Nacional de Trigo. Mercedes, Uruguay, 26 de agosto, 1999.

Haneklaus, S., Evans, E. and Schung, E. (1992) Baking Quality and sulphur content of wheat I. Influence of grain sulphur and protein concentrations on loaf volume. *Sulphur in Agriculture* 16, 31-34.

Haneklaus, S., and Schung, E. (1992) Baking quality and sulphur content of wheat II. Evaluation of the relative importance of genetics and environment including sulphur fertilization. *Sulphur in Agriculture* 16, 35-38.

Marschner H. 1986. Functions of Mineral nutrients: Macronutrients pp. 195-268. Functions of Mineral nutrients: micronutrientes. pp 269-340, in *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.

Messick, D.L., R.J. Morris, and J.M. Gabryszewski. 1992. Sulphur in crop production and sources to meet future requirements. In S. Portch (ed.). *Proc. Of Int. Symp. On the Role of Sulphur, Magnesium and Micronutrients in Balanced Plant Nitrogen*. p. 1-10 Potash and Sulphate Institute, Hong Kong.

Messick, D. 1992. Soil test interpretation for sulphur in the United States- an overview. *Sulphur in Agriculture* 16:24-25.

Melgar, R., M. Díaz Zorita y A. Caamaño. 1998?. Symposium (Francia)

Morón, A y W. Baethgen 1996. Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Serie Técnica N°73. INIA La Estanzuela. Uruguay. pp.16

Morón, A. y Risso, D. 2001. Effect of phosphorus, sulphur and micronutrients on rangeland white clover (*Trifolium repens* L.) improvement on basaltic soils in Uruguay. In: *Proceedings of the XIX International Grassland Congress*. Brazil, 2001, p181-182.

Morón, A. y Sawchik, J. 1998. Fertilización nitrogenada y potencial de mineralización de nitrógeno. In: *Jornada de Cultivos de Invierno. Serie Actividades de Difusión* 159. INIA La Estanzuela. p1-3

Moss, S.R., C.W. MacRitchie, F. And Randall, J.P..1981. Sulfur and nitrogen fertilizer effects on wheat II. Influence on grain quality. *Australian Journal of Agricultural Research* 32, 213-226.

Tisdale, S. L. R.B. Reneau, Jr and J.S. Platou. 1986. Atlas of sulphur deficiency. In Tabatabai, M.A. (ed.) *Sulphur in Agriculture*. P. 295-322. *Agron.* N°27..

Ventimiglia L.A., H.G. Carta y S.N. Rillo. Fertilización con Azufre en trigo: Curva de respuesta y comparación de fuentes. *Revista de Tecnología agropecuaria. Divulgación técnica del INTA Pergamino*. Vol.IV-N°11-Mayo/Agosto 1999.

Wall, J.S., 1971. Disulfide bonds: determination, location and influence on molecular properties of proteins. *Agricultural and Food Chemistry* 19, 619-625.