

CAPITULO I

INTRODUCCION GENERAL

1- EL CULTIVO DE SOJA *GLYCINE MAX* (L) MERR.**1.a- PRESENTANDO A *GLYCINE MAX* (L) MERR.**

La Soja (*Glycine max* (L) Merr.) pertenece a la familia de las Leguminosas (Fabaceae), y dentro de ella a la subfamilia de las Papilionoideas. El nombre *Glycine* deriva del vocablo griego “glykys” (dulce), y probablemente se refiere al sabor dulce de los tubérculos de una planta clasificada erróneamente como *Glycine apios* L. El uso de este vocablo como nombre genérico quedó injustificado a partir de la reclasificación de esta especie como *Apios americana* Medik. Sin embargo, para no alterar la denominación de una especie de gran difusión e importancia económica, se mantuvo su utilización para designar al género que incluye a la Soja y otras especies emparentadas (Hymowitz y Singh, 1987).

1.b- ORÍGENES Y EXPANSIÓN DE LA SOJA

La Soja es una especie originaria del norte y centro de China, donde fue introducida al cultivo probablemente en el siglo XI AC. En 1740 se plantó por primera vez en Europa (en el Jardín des Plantes). En América fue introducida a Georgia (EE.UU.) en 1765, y posteriormente a Illinois (EE.UU.) en 1851, desde donde se diseminó. En el año 1862 se realizaron las primeras plantaciones de Soja en Argentina, y en 1882 en Brasil (Giorda, 1997). En nuestro país, los primeros ensayos con el cultivo se realizaron entre 1909 y 1910, en distintas escuelas agrícolas y estaciones experimentales (Pascale, 1989). Luego de tres intentos fallidos de introducir la siembra de esta especie con fines comerciales (en 1919, 1935 y 1941-43), en 1956 la iniciativa prosperó (Giorda, 1997). Entre 1956 y

1960 se realizaron en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Pergamino los primeros estudios acerca del comportamiento varietal, y de prácticas de manejo y labranza. Las primeras investigaciones sobre Soja en la Universidad de Buenos Aires (UBA) se desarrollaron entre 1958 y 1963, y consistieron en ensayos de variedades y en la determinación de los requerimientos bioclimáticos del cultivo en cuanto a temperatura, fotoperíodo y humedad (Pascale, 1969). En 1962 se realizó la primera exportación de Soja, mediante un embarque de 6000 t con destino a Hamburgo (Alemania).

Con la fijación de un *precio mínimo oficial* y la compra garantizada al productor en 1965, y del *precio sostén* en 1966, la siembra de Soja se generalizó (Porzio, 1970), siguiendo un proceso de expansión creciente que aún hoy continúa. La aparición de variedades transgénicas resistentes a Glifosato en la campaña 1996/97 marcó un nuevo impulso a la difusión de la Soja, al bajar los costos de producción y, asociadas a la siembra directa, permitir su implantación en áreas hasta entonces marginales para la agricultura.

1.c- PERFIL NUTRICIONAL DE LA SOJA Y SU VALOR EN LA ALIMENTACIÓN HUMANA Y ANIMAL. USOS ALTERNATIVOS A LA ALIMENTACIÓN

La Soja tiene un amplio uso en alimentación humana y animal. Para los asiáticos los alimentos en base a Soja son cotidianos, en cambio en Occidente son más ocasionales y a veces difíciles de aceptar (Golbitz, 1993). Su consumo puede ayudar a paliar problemas nutricionales como la incidencia de enfermedades cardíacas asociadas al excesivo consumo de carne, o la desnutrición tan extendida

en países subdesarrollados. La Soja puede ingerirse como vegetal verde y fresco, porotos secos, harina, aceite, imitaciones de carne, leche, quesos, pastas y salsas.

Por otra parte, el poroto de Soja es el grano oleaginoso utilizado en alimentación con mayor cantidad (40 %) y mejor calidad de proteínas. Estas, pertenecientes al grupo de las caseínas, no producen ácido úrico en la digestión (Kopsic, citado por Cuniberti, 1997). Las proteínas de Soja contienen todos los aminoácidos esenciales para los seres humanos, y hay numerosos productos comerciales elaborados a partir de ellas (Cuniberti, 1997).

Respecto del aceite, la Soja es rica en ácidos grasos esenciales, y el mismo es considerado entre los mejores para la alimentación humana (Cuniberti, 1997). Contiene una elevada proporción de ácidos grasos insaturados, deseables desde el punto de vista de la nutrición. Sin embargo, en nuestro país su ingesta se restringe a pequeñas proporciones en mezclas con los de otros vegetales, siendo postergado por el de girasol.

El poroto de Soja presenta un tenor de carbohidratos inferior al de los cereales o la papa, y es apto para la alimentación de celíacos y diabéticos ya que su contenido de almidón no supera el 3 % (Kopsic, citado por Cuniberti, 1997). Además, el grano de Soja es una fuente importante de vitaminas y minerales. Se destacan las vitaminas A, B, D y E en el poroto seco, y la C en el grano verde. Entre los minerales, el Calcio (Ca), Fósforo (P), Hierro (Fe) y Zinc (Zn) son abundantes pero están poco disponibles por la presencia de ácido fítico y el efecto inhibidor de las proteínas de Soja sobre los dos últimos (Cuniberti, 1997).

Para la alimentación animal, el grano de Soja reúne la condición de ser rico en energía y en proteínas de elevada calidad. Sin embargo, debe ser desactivado total o parcialmente antes de utilizarse en la alimentación de monogástricos, por la presencia de factores antinutricionales que afectan la eficiencia de conversión hasta en un 40 % (Azcona y Shang, 1997). La Soja constituye un suplemento muy ventajoso frente a los problemas sanitarios generados por la utilización de proteínas de carne en la dieta animal.

Finalmente, el desarrollo de biocombustibles a partir de aceites vegetales puede constituir un destino alternativo que contribuya a mantener una elevada demanda del grano de Soja y absorba los continuos aumentos en la producción de esta oleaginosa.

1.d- IMPORTANCIA DE LA SOJA EN LA AGRICULTURA ARGENTINA

La Soja es el principal cultivo en nuestro país. En la campaña 2002/03 el área sembrada alcanzó a 12,5 millones ha y la producción a 36 millones t. A su vez, Argentina es el primer exportador mundial de aceite de Soja (52 % del mercado mundial), y el segundo exportador mundial de harina de Soja (45 % del mercado mundial) (Fuente: Grupo de Estudios Económicos y Sociales, EEA INTA Pergamino). El complejo sojero contribuye con el 25 % de las exportaciones totales, y es desde hace más de una década el principal conjunto exportador de nuestro país (Fuente: Grupo de Estudios Económicos y Sociales, EEA INTA Pergamino). Sin embargo, a pesar de la extraordinaria difusión del cultivo, los rendimientos medios a escala nacional (2800 kg ha^{-1} ; campaña 2002/03) (Fuente: USDA) distan de los potenciales ($\text{más de } 6000 \text{ kg ha}^{-1}$) y de los

obtenidos por los mejores productores (4000 - 4500 kg ha⁻¹). Por otra parte, los rendimientos en los lotes de producción comercial no han aumentado al mismo ritmo que el progreso genético alcanzado con la continua renovación de cultivares (G. Bartolomé, comunicación personal). Esto es atribuido principalmente a cuestiones de manejo (G. Bartolomé, comunicación personal). En este sentido, el ajuste de la fertilización puede contribuir sustancialmente a que las nuevas variedades expresen su potencial genético en condiciones de gran cultivo. Del mismo modo, el mayor requerimiento de competitividad que se verifica en el ámbito internacional obliga a los productores a hacer un manejo eficiente de los insumos, y en el plano de los fertilizantes refuerza la necesidad de ajustar dosis y formas de aplicación. El cultivo de Soja requiere grandes cantidades de nutrientes para su crecimiento, siendo Nitrógeno (N) el principal en orden de magnitud, seguido por Potasio (K), P, Ca y Azufre (S).

2- EL AZUFRE COMO NUTRIENTE DE LOS VEGETALES

2.a- FUNCIONES DEL AZUFRE EN LOS VEGETALES

El S cumple en los vegetales funciones estructurales y metabólicas (Duke y Reisenauer., 1986; Thompson et al., 1986; Tisdale et al., 1993; Marschner, 1995). La principal función estructural es la de formar puentes disulfuro entre cadenas de polipéptidos, lo cual estabiliza y determina la configuración (estructura terciaria) de las proteínas. Estos puentes confieren a las células resistencia a la deshidratación y las protegen de daños por frío (Levitt, citado por Marschner, 1995). Entre las funciones metabólicas, el S es necesario para la síntesis de coenzima A (involucrada en la formación de ácidos grasos y aminoácidos, y en el

ciclo de los ácidos tricarboxílicos), biotina, tiamina y glutathión (Schiff, 1983; Schmidt y Jäger, 1992). También forma parte de componentes como sulfolípidos y ferredoxina (Schiff, 1983; Schmidt y Jäger, 1992), la cual participa en la reducción de nitritos y sulfatos, y en la fijación simbiótica de N en los nódulos de las leguminosas. Por otro lado el S, sin formar parte de ella, es necesario para la síntesis de clorofila (Burke et al., 1986; Dietz, 1989) y favorece la formación de aceite en las oleaginosas (Thompson et al., 1986). El grupo thiol, uno de los compuestos orgánicos azufrados más abundantes, integra la molécula de glutathión, un tripéptido con gran poder antioxidante (Cakmak y Marschner, 1992), y que constituye una forma de reserva del S orgánico reducido en las células (Schütz et al., 1991). También interviene en mecanismos de detoxificación de xenobióticos (ej: atrazina) y es precursor de sustancias que acomplejan metales pesados en las plantas, las fitoquelatinas (Grill et al., 1987; Rauser, 1990). Por último, el S forma compuestos que intervienen en el metabolismo secundario, como aleínas (género *Allium*) y glucosinolatos (Crucíferas) (Schnug, 1990, 1993).

2.b- SÍNTOMAS Y CONSECUENCIAS DE LA INSUFICIENCIA DE S

Las deficiencias de S causan disminución en los rendimientos y en la calidad de los granos por reducción de su contenido proteico (Schnug, 1990, 1991). A su vez, analizando el valor biológico de las proteínas sintetizadas, la calidad de éstas se reduce ya que disminuye el tenor de aminoácidos azufrados (Schnug, 1990; Haneklaus et al., 1992; Haneklaus y Schnug, 1992), algunos de los cuales (metionina y cisteína) son esenciales para la alimentación del hombre y los animales de interés agropecuario (Hymowitz, 1985). Paralelamente, se

produce la acumulación de N debido a la marcada inhibición de la síntesis proteica (Freney et al., 1978; Karmoker et al., 1991), fenómeno que es aprovechado para diagnosticar carencias a través del cálculo de la relación N/S (Spencer y Freney, 1980; Nuttall, 1985; Jones, 1986). En plantas deficientes en S el crecimiento se reduce, las hojas presentan un menor tamaño y los tallos son más angostos (Burke et al., 1986). También se produce una clorosis foliar manifiesta causada por la disminución en la síntesis de clorofila (Burke et al., 1986; Dietz, 1989), que comienza a observarse, a diferencia de las deficiencias de N, en las hojas más jóvenes, debido a la lenta translocación del S en la planta (Freney et al., 1978). La senescencia foliar se acelera, y se reduce la nodulación en las leguminosas. La reducción de la actividad fijadora es más pronunciada que la depresión en la fotosíntesis (De Boer y Duke, 1982); por lo tanto, en las leguminosas los síntomas visuales de carencias de S suelen ser indistinguibles de los de N (Anderson y Spencer, 1950). La gran sensibilidad a la falta de S se presenta a nivel de la Nitrogenasa, y no del Rhizobium (O'Hara et al., 1987).

Otras consecuencias fisiológicas de la falta de S son una reducción de la relación tallo/raíz (Edelbauer, 1980), y la disminución de la conductividad hidráulica de raíces, la apertura estomática y la fotosíntesis neta (Karmoker et al., 1991).

2.c- CAUSAS DEL AGOTAMIENTO DEL S EN LOS SUELOS

En los últimos años, el Azufre (S) ha surgido como un nutriente con elevada expectativa de respuesta en rendimiento en las principales zonas de cultivo de Soja de la Argentina. La larga tradición agrícola con laboreo excesivo

de los suelos, la quema de rastrojos, y la secuencia continua de cultivos sin rotaciones con praderas (y aún sin rotación con cultivos de gramíneas) han disminuido progresivamente el contenido de materia orgánica en los suelos. Esto repercutió en forma directa en la disponibilidad de S, ya que la fracción orgánica representa el 95 % del contenido total del nutriente en el suelo (Ericksen, 1997 *a*). En este sentido, Andriulo et al., (1996) estimaron una pérdida de 6,5 kg S ha⁻¹ año⁻¹ en 80 años de agricultura. Sumado a ésto, los altos rendimientos obtenidos en los cultivos de cosecha durante los últimos años, con aplicación de Nitrógeno (N) y P pero sin agregado de S, han intensificado la extracción. Otros autores estiman una exportación media, con los actuales niveles de rendimiento, de 10 kg S ha⁻¹ año⁻¹ (Martínez y Cordone, 2000). Cabe mencionar, por otra parte, que mientras la relación C/N se estabiliza luego de un cierto tiempo de agricultura continua, las reservas de S pueden seguir disminuyendo, manteniendo cierta provisión a los cultivos. Esto puede llevar a un agotamiento muy pronunciado del S del suelo (McLaren y Swift, 1977).

Por otra parte, las vías naturales de reposición son despreciables en zonas alejadas del mar (Till y Blair, 2002), en cultivos de secano (Beaton y Soper, 1986), o donde las emisiones de S de la industria hacia la atmósfera son poco significativas (Hoeft y Fox, 1986, Ericksen et al., 1998), situación que acontece en la región pampeana argentina. Las excretas animales y el S contenido en el agua del suelo (por ej: en el agua proveniente de las napas freáticas) son otras vías de aporte de S (Ericksen et al., 1998), sin embargo, esta situación no es demasiado

frecuente en la zona sojera argentina, exceptuando períodos aislados de excesos hídricos.

2.d- EXPERIENCIAS EN FERTILIZACIÓN AZUFRADA DE SOJA Y OTROS CULTIVOS

Diversos autores han reportado incrementos en los rendimientos por la aplicación de S en Soja de primera en el centro-sur de Santa Fe (Martínez y Cordone, 1998, 2000), centro-norte de Bs. As. (Gutiérrez Boem et al., 1999, 2000; Scheiner et al., 1999 *a*) o en ambas regiones (Melgar y Gearhart, 2000), así como por la aplicación conjunta de S + P y S + N en este cultivo (Martínez y Cordone, 1998). También se ha registrado respuesta a la fertilización azufrada en Soja de segunda, tanto por la aplicación directa al cultivo como por efectos residuales del S aplicado en Trigo (Martínez y Cordone, 1998; Martínez et al., 1999; Gerster y Salvagiotti, 2002). Adicionalmente, se han observado respuestas a la aplicación de S en Maíz (Ferrari et al., 1999 *a*; Martínez y Cordone, 1999), en Trigo (Martínez y Cordone, 1998; Martínez et al., 1999) y Colza (Rubio et al., 1996). Sin embargo, en otras investigaciones no se verificaron aumentos en los rendimientos por la aplicación de S en Soja (Caviglia et al., 1999; Ferraris et al., 2001 *a*; 2001 *b*). En relación con las experiencias de fertilización, cabe destacar que el precio del grano de Soja tradicionalmente ha mantenido una interesante relación insumo/producto con respecto al de los fertilizantes; por lo tanto, aún con niveles no demasiado elevados de respuesta la práctica puede ser económicamente rentable.

2.e- DIAGNÓSTICO DE FERTILIDAD AZUFRADA: MÉTODOS EMPLEADOS EN ARGENTINA Y EN OTRAS REGIONES DEL MUNDO

No obstante haberse observado deficiencias de S en la región pampeana, aún no se cuenta con un método de diagnóstico en el cual basar las recomendaciones de fertilización. En el centro-sur de Santa Fe (más precisamente en el área de influencia de la localidad de Casilda) se concluyó que las respuestas a S ocurren en especial en suelos con larga historia agrícola bajo labranza convencional y monocultivo de Soja, escaso contenido de materia orgánica (MO) y sometidos a procesos de erosión hídrica (Martínez y Cordone, 1998). Sin embargo, en ambientes similares de otras regiones de cultivo no se registraron respuestas positivas a la fertilización (Ferraris et al., 2001 *a*), y sí se observaron respuestas en sitios que no presentaban estas características (Gutiérrez Boem et al., 2000). En algunas áreas de nuestro país, como en el centro-norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba, las recomendaciones de fertilización con frecuencia se efectúan basándose en una identificación de "ambientes de baja o alta expectativa de respuesta" (Martínez y Cordone, 1998, 2000; Martínez et al., 1999). Otros métodos más específicos han sido evaluados en experimentos aislados, sin un número de sitios suficiente como para abarcar ambientes diferenciales de respuesta ni tampoco probar la estabilidad geográfica e interanual de los criterios bajo estudio. En este sentido, cabe mencionar la determinación a la siembra de la concentración de S-Sulfatos en suelo, evaluada a diferentes profundidades, y el contenido de MO en capa superficial de suelo (0-20 cm) (Martínez y Cordone, 1998; Gutiérrez Boem et al., 2000; Ferraris et al., 2001 *a*).

Otra medición efectuada en nuestro país es la concentración de S en hojas pertenecientes a plantas que se encuentran en un estado vegetativo temprano (Martínez y Cordone, 1998; Ferraris et al., 2001 *a*). Entre los criterios utilizados en otras regiones del mundo, pueden mencionarse la textura del suelo (Johnson, 1987), la aplicación de una dosis proporcional a la escogida para N (Johnson y Fixen, 1990), un índice que incluye la estimación del S mineralizado en el suelo (Ghani, 1994), así como las relaciones entre nutrientes en hoja (Agrawal y Mishra, 1994) y la concentración de S en planta entera (Schnug y Haneklaus, 1998).

Los métodos evaluados con fines de diagnóstico en esta tesis se describen en capítulos posteriores, como también los antecedentes que condujeron a su elección. El **Capítulo IV** trata el estudio del diagnóstico de S basado en los análisis de suelo, mientras que el **Capítulo V** se basa en los análisis foliares y su valoración como criterios de recomendación.

En la mayor parte de los ensayos sobre fertilización en Soja se ha evaluado la respuesta del cultivo a mezclas fertilizantes compuestas por dos o más nutrientes, o se han comparando diferentes productos comerciales, sin detenerse en el estudio de un nutriente en particular. En este trabajo se plantea explorar la respuesta de la Soja a la aplicación de S en las condiciones agroecológicas de la pradera pampeana y evaluar indicadores que permitan predecirla.

3- OBJETIVOS DE LA TESIS

- ♦ Valorar la utilidad de diferentes indicadores de suelo y de cultivo para predecir la respuesta de la Soja a la fertilización con S.

-
- ♦ Evaluar el comportamiento de estos indicadores y la potencialidad de respuesta de la Soja a la fertilización azufrada a través de diferentes condiciones de clima y suelo.
 - ♦ Establecer umbrales críticos para aquellos métodos que demuestren ser más eficientes en predecir la respuesta a la fertilización y lo suficientemente prácticos como para ser utilizados como herramienta de diagnóstico en cultivos extensivos.

4- HIPÓTESIS

- ♦ La respuesta de la Soja a la fertilización azufrada puede predecirse adecuadamente a través de indicadores de suelo y de cultivo.
- ♦ El comportamiento de la Soja al agregado de S y el valor predictivo de las herramientas de diagnóstico evaluadas varía entre las diferentes regiones sojeras.

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOS

1- PRESENTACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

Durante la campaña 1999/00 se realizaron los experimentos preliminares que permitieron explorar el potencial de respuesta de la Soja al S en el área de influencia de la EEA Pergamino, y hacer una evaluación inicial de los indicadores de respuesta medidos en el suelo y el cultivo (Ferraris et al., 2001 *a*). En ese mismo ciclo se elaboró la curva de absorción de S a lo largo de la estación de crecimiento, y se determinaron los requerimientos del cultivo y la exportación del nutriente con los granos cosechados, tal como se detalla en el **Capítulo III**. Estas últimas evaluaciones se repitieron durante la campaña 2001/02, y en ambos casos se realizó sobre una parcela fertilizada con S y especialmente instalada con este propósito.

En el ciclo agrícola 2000/01 se realizaron los experimentos destinados a evaluar la utilidad de diferentes indicadores de suelo y de planta para predecir la respuesta de la Soja de primera siembra a la fertilización azufrada. Con el mismo fin, durante la campaña 2001/02 se condujeron ensayos adicionales, aunque en un menor número de sitios. Todos estos experimentos integraron una red de ensayos de fertilización, con la participación del INTA (a través de varias de sus Estaciones Experimentales y Unidades de Extensión) y la Facultad de Agronomía de la UBA (Cátedra de Fertilidad y fertilizantes) en la conducción de los ensayos, y del INPOFOS-Cono Sur y el Proyecto Fertilizar del INTA en la tarea de coordinación. Los datos que integran esta evaluación de métodos de diagnóstico fueron obtenidos de 29 experimentos conducidos en el ciclo 2000/01 (de los cuales el grupo de trabajo del tesista condujo dos) y de otros 17 experimentos

realizados en la campaña 2001/02 (el grupo de trabajo del tesista condujo uno), en el cultivo de Soja de primera. El análisis de la respuesta de la Soja a la fertilización azufrada dentro de esta red, y el estudio de diversas herramientas de diagnóstico basándose en la correlación de dicha respuesta con indicadores de suelo y de cultivo, constituyen el cuerpo central de esta tesis.

2- DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS EVALUADOS

En todos los experimentos de la red se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados, con 2, 3 ó 4 repeticiones (en 1, 7 y 38 de los experimentos realizados, respectivamente). El tamaño de la unidad experimental varió según la localidad, y fue del ancho de una o dos pasadas de la sembradora utilizada para implantar el correspondiente ensayo por 20-50 m de largo, con excepción de una localidad donde el largo de la parcela fue de 200 m.

Los tratamientos evaluados durante el primer año fueron los siguientes:

T0: Testigo absoluto, sin fertilización

T1: P (20 kg P ha⁻¹)

T2: S (15 kg S ha⁻¹)

T3: P + S (20 kg P ha⁻¹ + 15 kg S ha⁻¹)

T4: P + S + K + Magnesio (Mg) + Micronutrientes (20 kg P ha⁻¹ + 15 kg S ha⁻¹ + 14 kg K ha⁻¹ + 12 kg Mg ha⁻¹ + 2 kg Zn ha⁻¹ + 1 kg Cobre (Cu) ha⁻¹ + 1 kg Boro (B) ha⁻¹).

Durante el segundo año de ensayos el tratamiento 4 (T4) difirió levemente, ya que entre los micronutrientes no se incluyó al Cu. Los restantes tratamientos permanecieron idénticos a los estudiados en el primer año.

Las fuentes fertilizantes utilizadas fueron las mismas en todos los ensayos: Superfosfato triple de calcio (0-20-0) para el tratamiento T1, Sulfato de amonio (21-0-0-24 S) en T2 y una mezcla física de las dos anteriores en T3. Para el tratamiento T4 se utilizó Superfosfato triple de calcio (0-46-0), Sulpomag (0-0-19-11Mg-22S), Zincogran (30% Zn), Borogran (10% B) y Oxisulfato de Cobre (20% Cu), este último solamente en la campaña 2000/01.

A través de este esquema se pretendió contrastar la aplicación de S con el testigo absoluto sin agregado de P (T2 vs T0) y con requerimientos cubiertos de P (T3 vs T1). El tratamiento que recibió todos los nutrientes (T4) no reviste importancia para los objetivos centrales de esta tesis.

3- AMPLITUD GEOGRÁFICA, AGROCLIMÁTICA Y PRODUCTIVA DE LOS SITIOS EXPERIMENTALES

La red abarcó 29 ensayos de campo durante la campaña 2000/01, distribuidos en la mayor parte del área sojera argentina. En la campaña 2001/02, se realizaron nuevos experimentos en 17 localidades, con el objetivo de verificar las tendencias observadas en el primer año. De esta manera, se intentó cubrir una variedad de condiciones texturales, de calidad de suelos y de potenciales de producción, como así también de la variabilidad climática que pudiera manifestarse en las regiones abarcadas por la red en dos años consecutivos.

La ubicación de los ensayos y la clasificación de los suelos correspondientes a cada sitio experimental se detallan en las Tablas 1 y 2. Los datos de las series y tipos de suelo fueron tomados de las respectivas cartas de

suelo elaboradas por INTA, a excepción de los ensayos Rivadavia y Trenque Lauquen, cuyos suelos fueron clasificados por el laboratorio Tecnoagro.

Tabla 1- Localización (partido o departamento y provincia), serie y tipo de suelo del sitio experimental correspondiente a los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS. Campaña 2000/01.

Partido/ Departamento	Provincia	Serie de Suelos	Tipo de Suelos (subgrupo)
1. San Jerónimo I-1	Santa Fe	Clason	Argiudol típico
2. Las Colonias	Santa Fe	Esperanza	Argiudol típico
3. Belgrano I-1	Santa Fe	Los Cardos	Argiudol típico
4. Paraná I-1	Entre Ríos	(no informado)	(no informado)
5. Paraná I-2	Entre Ríos	Los Capones	Pelludert argílico
6. Río Cuarto I-1	Córdoba	Olaeta	Haplustol údico
7. Marcos Juárez I-1	Córdoba	Marcos Juárez	Argiudol típico
8. Marcos Juárez I-2	Córdoba	Marcos Juárez	Argiudol típico
9. Iriondo	Santa Fe	Marcos Juárez	Argiudol típico
10. Caseros	Santa Fe	Casilda (fase moderadamente ondulada y severamente erosionada)	Argiudol típico
11. General López	Santa Fe	Hughes	Argiudol típico
12. Colón I-1	Bs As	Rojas	Argiudol típico
13. Pergamino I-1	Bs As	Pergamino	Argiudol típico
14. Pergamino I-2	Bs As	Pergamino (fase moderadamente. erosionada)	Argiudol típico
15. S. A. de Areco I-1	Bs As	Capitán Sarmiento	Argiudol típico
16. S. A. de Areco I-2	Bs As	Capitán Sarmiento	Argiudol típico
17. Rojas	Bs As	Rojas	Argiudol típico
18. Junín I-1	Bs As	Junín	Hapludol típico
19. Junín I-2	Bs As	O'Higgins	Argiudol típico
20. 9 de Julio I-1	Bs As	Norumbega	Hapludol éntico
21. 9 de Julio I-2	Bs As	La Albina	Hapl. Thapto nátrico
22. Tandil I-1	Bs As	Tandil	Argiudol típico
23. Tandil I-2	Bs As	Tandil	Argiudol típico
24. Rivadavia	Bs As	América	Hapludol éntico
25. Trenque Lauquen	Bs As	América	Hapludol éntico
26. Maracó	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico

(continúa...)

Tabla 1- (continuación)

Partido/ Departamento	Provincia	Serie de Suelos	Tipo de Suelos (subgrupo)
27. Catriló I-1	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico
28. Catriló I-2	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico
29. Capital I-1	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico

Los números romanos indican el año en que se realizó el ensayo, para aquellas localidades donde se implantó más de un experimento. (I: campaña 2000/01). El número arábigo representa la numeración del ensayo dentro de la localidad.

(no detallado): Significa que los suelos no han sido relevados a ese nivel de detalle.

Tabla 2- Localización (partido o departamento y provincia), serie y tipo de suelo del sitio experimental correspondiente a los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS. Campaña 2001/02.

Partido/ Departamento	Provincia	Serie de Suelos	Tipo de Suelos
30. Tercero Arriba	Córdoba	(no detallado)	Molisol
31. Río Segundo	Córdoba	(no detallado)	Entisol
32. San Jerónimo II-1	Santa Fe	Clason	Argiudol típico
33. Belgrano II-1	Santa Fe	Armstrong	Argiudol típico
34. Paraná II-1	Entre Ríos	Los Capones	Pelludert argílico
35. Uruguay	Entre Ríos	Don Guillermo	Pelludert argílico
36. Marcos Juárez II-1	Córdoba	Marcos Juárez	Argiudol típico
37. Río Cuarto II-1	Córdoba	(no detallado)	Haplustol údico
38. Constitución	Santa Fe	Pergamino	Argiudol típico
39. Colón II-1	Bs As	Rojas	Argiudol típico
40. S. A. de Areco II-1	Bs As	Capitán Sarmiento	Argiudol típico
41. Junín II-1	Bs As	Junín	Hapludol típico
42. Junín II-2	Bs As	Junín	Hapludol típico
43. 9 de Julio II-1	Bs As	Norumbega	Hapludol éntico
44. General Pinto	Bs As	Lincoln	Hapludol típico
45. Tandil II-1	Bs As	Tandil	Argiudol típico
46. Capital II-1	La Pampa	(no detallado)	Haplustol éntico

Los números romanos indican el año en que se realizó el ensayo, para aquellas localidades donde se implantó más de un experimento.(II: campaña 2001/02). El número arábigo representa la numeración del ensayo dentro de la localidad.

(no detallado): Significa que los suelos no han sido relevados a ese nivel de detalle.

A la diversidad geográfica, se sumó la amplia gama de cultivos antecesores, años de agricultura continua y sistemas de labranza que caracterizaron a los sitios experimentales incluidos en la red. Esta información se detalla en las Tablas 3 (campaña 2000/01) y 4 (campaña 2001/02).

Tabla 3- Años de agricultura, cultivo antecesor y sistema de labranza de los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2000/01.

Partido/ Departamento	Años de Agricultura	Cultivo Antecesor	Sistema de Labranza
1. San Jerónimo I-1	40	Soja	SD
2. Las Colonias	16	Maíz	SD
3. Belgrano I-1	> 20	Soja 1ra	SD
4. Paraná I-1	(sin información)	Soja 1ra	SD
5. Paraná I-2	(sin información)	Trigo/Soja	SD
6. Río Cuarto I-1	> 10	Verdeo Invernal	LC
7. Marcos Juárez I-1	> 11	Maíz	SD
8. Marcos Juárez I-2	> 12	Soja	SD
9. Iriondo	15	Maíz	SD
10. Caseros	> 20	Soja 1ra	SD
11. General López	> 30	Avena	SD
12. Colón I-1	10	Arveja	SD
13. Pergamino I-1	5	Maíz	LC
14. Pergamino I-2	5	Sorgo	SD
15. S. A. de Areco I-1	30	Maíz	LC
16. S. A. de Areco I-2	< 5	Maíz	SD
17. Rojas	6	Maíz	SD
18. Junín I-1	> 20	Maíz	LC
19. Junín I-2	> 10	Soja	SD
20. 9 de Julio I-1	5	Soja 1ra	SD
21. 9 de Julio I-2	20	Trigo/Soja	SD
22. Tandil I-1	8	Maíz	SD
23. Tandil I-2	4	Trigo	SD
24. Rivadavia	(sin información)	Maíz	SD
25. Trenque Lauquen	(sin información)	Maíz	SD
26. Maracó	1	Maíz	SD
27. Catriló I-1	> 20	Girasol	LC
28. Catriló I-2	> 20	Maíz	LM
29. Capital	> 20	Girasol	SD

SD: Siembra Directa

LC: Labranza Convencional

LM: Labranza Mínima

Tabla 4- Años de agricultura, cultivo antecesor y sistema de labranza de los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2001/02.

Partido/ Departamento	Años de Agricultura	Cultivo Antecesor	Sistema de Labranza
30. Tercero Arriba	(sin información)	(sin información)	(sin información)
31. Río Segundo	(sin información)	(sin información)	(sin información)
32. San Jerónimo II-1	> 40	Trigo/Soja	SD
33. Belgrano II-1	20	Maíz	SD
34. Paraná II-2	10	Trigo/Soja	SD
35. Uruguay	>5	Barbecho	LM
36. Marcos Juárez II-1	> 10	Maíz	SD
37. Río Cuarto II-1	> 10	Maíz	SD
38. Constitución	> 15	Sorgo	SD
39. Colón II-1	> 20	Maíz pisingallo	SD
40. S. A. de Areco II-1	8	Maíz	SD
41. Junín II-1	> 20	Maíz	SD
42. Junín II-2	> 10	Maíz	LC
43. 9 de Julio II-1	> 30	Soja	SD
44. General Pinto	4	Maíz	SD
45. Tandil II-1	5	Trigo	SD
46. Capital II-1	4	Maíz	SD

SD: Siembra Directa

LC: Labranza Convencional

LM: Labranza Mínima

4- CARACTERIZACIÓN Y CONDUCCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS DE LA RED

En todos los sitios se condujeron experimentos de campo, instalados en establecimientos de productores o en los predios de Estaciones Experimentales del INTA. En todos los ensayos se implementaron prácticas de manejo adecuadas de modo de posibilitar una alta productividad del cultivo e inducir una demanda elevada de S. Con este fin, se sembraron variedades adaptadas y difundidas en cada zona, con alto potencial de rendimiento, y se mantuvieron los sitios

experimentales desmalezados y libres de plagas durante todo el ciclo. Los cultivos fueron conducidos en condiciones de secano.

Las semillas fueron inoculadas con bacterias de *Bradyrhizobium japonicum* (en doble dosis) para favorecer la nodulación y potenciar la fijación simbiótica de N, debido a que su magnitud es frecuentemente asociada con la disponibilidad de S. Con este mismo propósito, junto al inoculante se agregó un producto comercial a base de Cobalto (0,5 % Co) y Molibdeno (10 % Mo), en dosis de 1 y 20 g ha⁻¹ de cada uno de estos elementos, respectivamente. Ambos nutrientes son considerados esenciales para el proceso de fijación biológica de N (Marschner, 1995; Mengel y Kirby, 2000).

Todos los fertilizantes fueron colocados en bandas al costado y/o por debajo de la línea de siembra, separados de las semillas para evitar efectos de fitotoxicidad.

Los principales datos del manejo efectuado en cada uno de los experimentos se muestran en la Tabla 5 para la campaña 2000/01, y en la Tabla 6 para la campaña 2001/02.

Tabla 5- Fecha de siembra y cosecha, variedad y espaciamiento entre surcos utilizados en los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2000/01.

Partido/Departamento	Fecha siembra	Fecha Cosecha	Variedad	Espaciamiento
1. San Jerónimo I-1	23/11/00	28/3/01	ACA R 405	70 cm
2. Las Colonias	16/11/00	29/3/01	ACA R 405	38 cm
3. Belgrano I-1	7/11/00	26/3/00	DM 4800 RR	52 cm
4. Paraná I-1	7/12/00	(sin inform)	A 6445 RG	52 cm
5. Paraná I-2	20/11/00	(sin inform)	DM 4800 RR	52 cm
6. Río Cuarto I-1	17/11/00	20/4/01	DM 4800 RR	70 cm
7. Marcos Juárez I-1	29/11/00	23/4/01	DM 4800 RR	70 cm
8. Marcos Juárez I-2	20/11/00	16/4/01	DM 4800 RR	70 cm
9. Iriondo	21/11/00	(sin inform)	DM 4800 RR	70 cm
10. Caseros	4/12/02	20/4/01	DM 4800 RR	52 cm
11. General López	27/11/00	1/4/01	A 4100 RG	70 cm
12. Colón I-1	8/12/00	26/4/01	DM 48	52 cm
13. Pergamino I-1	16/11/00	(sin inform)	A 4100 RG	70 cm
14. Pergamino I-2	28/10/00	20/4/01	A 4100 RG	70 cm
15. S. A. de Areco I-1	18/11/00	27/4/01	A 4456 RG	52 cm
16. S. A. de Areco I-2	18/11/00	27/4/01	A 4456 RG	52 cm
17. Rojas	28/11/00	5/5/01	DM 4800 RR	70 cm
18. Junín I-1	29/11/00	12/4/01	A 4456 RG	52 cm
19. Junín I-2	20/11/00	3/4/01	DM 4300 RR	70 cm
20. 9 de Julio I-1	30/11/00	28/4/01	DM 3800 RR	52 cm
21. 9 de Julio I-2	29/11/00	25/4/01	DM 4800 RR	70 cm
22. Tandil I-1	29/11/00	25/4/01	DM 4800 RR	35 cm
23. Tandil I-2	28/11/00	(sin inform)	DM 4800 RR	35 cm
24. Rivadavia	27/10/00	10/4/01	A 3401 RG	70 cm
25. Trenque Lauquen	4/11/00	14/5/01	DM 3800 RR	52 cm
26. Maracó	10/11/00	11/4/01	DM 4000 RR	40 cm
27. Catrilo I-1	24/11/00	23/4/01	A 4100 RG	40 cm
28. Catrilo I-2	26/11/00	20/4/01	P 9396 RR	35 cm
29. Capital	30/11/00	17/4/01	P 9396 RR	40 cm

Tabla 6- Fecha de siembra y cosecha, variedad y espaciamiento entre surcos utilizados en los ensayos de la red de fertilización en Soja de primera INTA-Fertilizar-INPOFOS Cono Sur. Campaña 2001/02

Partido/Departamento	Fecha siembra	Fecha Cosecha	Variedad	Espaciamiento
30. Tercero Arriba	(sin inform)	(sin inform)	(sin inform)	(sin inform)
31. Río Segundo	(sin inform)	(sin inform)	(sin inform)	(sin inform)
32. San Jerónimo II-1	20/11/01	3/4/02	DM 4800 RR	52 cm
33. Belgrano II-1	3/11/01	(sin inform)	DM 4800 RR	52 cm
34. Paraná II-1	18/12/01	9/5/02	Mercedes 70	52 cm
35. Uruguay	14/11/01	9/5/02	A 5409 RG	52 cm
36. Marcos Juárez II-1	16/11/01	26/4/02	DM 4800 RR	70 cm
37. Río Cuarto II-1	23/11/01	9/5/02	DM 4800 RR	70 cm
38. Constitución	26/11/01	(sin inform)	DM 4800 RR	38 cm
39. Colón II-1	9/11/01	4/4/02	A 4201 RG	52 cm
40. S.A. de Areco II-1	11/11/01	20/4/02	DM 4800 RR	52 cm
41. Junín II-1	2/11/01	22/3/02	DM 4400 RR	70 cm
42. Junín II-2	19/11/01	9/4/02	DM 4800 RR	70 cm
43. 9 de Julio II-1	1/12/01	3/5/02	DM 4800 RR	52 cm
44. General Pinto	8/12/01	22/4/02	DM 4800 RR	52 cm
45. Tandil II-1	17/11/01	23/4/02	DM 3800 RR	38 cm
46. Capital II-1	20/11/01	17/4/02	P 9396 RR	35 cm

5- EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS Y CÁLCULO DE LA RESPUESTA A S

Los ensayos se cosecharon en forma mecánica (mediante cosechadoras automotrices) o manual. Cuando se utilizó cosecha mecánica, esta se realizó sobre una superficie que varió entre 56 y 2000 m². Las muestras de grano fueron pesadas en balanzas con una precisión que varió entre 0,1 a 5 kg ha⁻¹, dependiendo de la superficie cosechada, y, dentro de cada ensayo, los rendimientos de las parcelas fueron uniformados a un mismo valor de humedad. En cambio, cuando se efectuó cosecha manual, se realizó tomando muestra/s representativa/s (de una a cinco) en cada una de las parcelas evaluadas. Las

muestras fueron trilladas en máquinas estacionarias, y el grano pesado en balanzas con una precisión < 0,1 kg. Al igual que los ensayos cosechados en forma mecánica, los rendimientos de los diferentes tratamientos fueron corregidos a un idéntico valor de humedad y analizados por análisis de varianza. Estos rendimientos, promedio de dos, tres o cuatro repeticiones, se muestran en el **Capítulo IV**. Para estudiar la asociación entre la respuesta al agregado de S y las variables de suelo y cultivo se utilizaron procedimientos de regresión lineal simple y múltiple, y una adaptación del método de cuadrantes de Cate y Nelson (Cate y Nelson, 1965). Se estudió si la respuesta difería por efecto de variables categóricas relacionadas con el manejo del cultivo, a través de análisis de varianza de una vía.

El cálculo de la respuesta se realizó en forma diferencial para las evaluaciones de suelo y foliares. Para las evaluaciones de suelo, la respuesta se calculó como un promedio de las diferencias en rendimiento entre los tratamientos fertilizados con S y los tratamientos testigo sin S, tuvieran o no fertilización fosforada de base, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Respuesta a S} = [(T2-T0) + (T3-T1)]/2$$

Previo al cálculo de la respuesta, se analizó la interacción PxS (evaluada eliminando del análisis al tratamiento “completo”, T4). Dicha interacción no fue estadísticamente significativa en 41 de los 46 sitios ($P > 0,10$), lo cual habilita en estos 41 ensayos a calcular la respuesta como fue expresado en la ecuación anterior. Los ensayos con interacción PxS estadísticamente significativa fueron Junín I-2 ($P=0,0859$), 9 de Julio I-1 ($P=0,0175$), Catriló I-1 ($P=0,0269$), Catriló I-

2 ($P=0,032$) y Junín II-2 ($P=0,0150$). De ellos, los ensayos Catriló I-1 y Junín II-2 no fueron tenidos en cuenta en el análisis final de los datos, por razones estadísticas (ver Capítulo IV, **3.a.2**) o metodológicas (ver Capítulo IV, **3.b.2**), respectivamente. Los restantes ensayos con interacción PxS significativa expresaron diferencias de rendimiento negativas entre los tratamientos fertilizados y sus testigos en algunas de las comparaciones (T3 vs T1 en Junín I-2 y 9 de Julio I-1, y T2 vs T0 en Catriló I-2), sin que estas tuvieran una explicación aparente. En todos los casos, la restante diferencia resultó positiva a favor de los tratamientos fertilizados. No hay evidencias que justifiquen este comportamiento diferencial entre ambas situaciones de fertilización con P. Para atenuar las desviaciones (especialmente las negativas) resultantes de las diferencias individuales sin recurrir a la eliminación de tratamientos dentro de un ensayo particular, la respuesta en estos sitios se calculó de la misma manera que en aquellos en los que la interacción PxS no fue estadísticamente significativa. Luego, se estudió la capacidad de las variables de suelo para explicar esta respuesta media.

Para los análisis foliares se dispuso de un valor *por tratamiento* en cada bloque, a diferencia de los análisis de suelo donde se disponía de un único valor *por repetición*. Entonces, la respuesta al S se calculó en forma separada: (T2-T0) y (T3-T1) y el valor resultante se relacionó con las respectivas variables independientes, consideradas también en forma separada. De esta manera, se pretendió estudiar si el agregado de P podía producir una modificación de la concentración de S en los tejidos foliares de la planta o en los índices de cultivo evaluados. El detalle de estos procedimientos y la definición de las variables

correspondientes se especifica en el **Capítulo IV**, para los análisis de suelo, y en el **Capítulo V** para las evaluaciones foliares.

CAPITULO III

REQUERIMIENTOS DE S DE LA SOJA

1- INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los requerimientos nutricionales de un cultivo, cotejado con la capacidad del suelo para satisfacerlos, es un paso necesario para determinar las necesidades de fertilización. Las estrategias que contemplan la reposición de los nutrientes exportados por los granos de cosecha, basan el cálculo de la dosis a aplicar en una adecuada estimación de los requerimientos y de la fracción exportada de los principales elementos, en la región pampeana N, P y S.

Los requerimientos de S (kg S en materia seca aérea total t^{-1} de grano producido) del cultivo de Soja informados en la bibliografía son dispares, como los que pueden derivarse de Hoefl y Fox (1986) o Scheiner et al. (2000), de 2,65 y 3,14 $kg t^{-1}$ respectivamente, y los mencionados por Stanford y Jordan (1966) de 7,25 $kg t^{-1}$. Por su parte, Deloch (citado por Marschner, 1995) menciona un porcentaje de S en grano de 0,32, valor que en base a un índice de cosecha para este nutriente de 0,67 (García, 2000), representaría un requerimiento del orden de 4,78 $kg t^{-1}$ de grano. Lavado et al. (2001) determinaron concentraciones menores (0,22-0,26 %), las cuales, de acuerdo al razonamiento anterior, equivaldrían a una necesidad de 3,28 a 3,88 $kg t^{-1}$. González (2000), considerando el contenido de S promedio de 46 muestras de grano, sugiere una exportación de 1,3 $kg t^{-1}$ de grano. Con un supuesto índice de cosecha de 0,67 los requerimientos derivados de este valor serían de 1,94 $kg t^{-1}$ de grano. Entre las causas que provocan estas importantes diferencias, puede mencionarse a la absorción de nutrientes en cantidades superiores a las necesarias para lograr un óptimo crecimiento. Los cultivos alcanzan este consumo “de lujo” cuando el suelo está muy bien provisto

del elemento, y en el caso del S esto se ve facilitado por ser un nutriente demandado en cantidades relativamente pequeñas si se lo compara con otros macronutrientes como N o K. Por otra parte, muchos de los valores mencionados precedentemente provienen de recopilaciones bibliográficas, y fueron determinados en experimentos conducidos en otros países, bajo condiciones productivas y de suelo diferentes, y con variedades de Soja distintas a las comúnmente utilizadas en la región sojera argentina. Este último factor, a su vez, introduce cambios en la producción de materia seca total y el índice de cosecha del cultivo, lo cual incide también en los requerimientos y exportación de S. En función de la escasez de información local debidamente validada, se estudió la evolución de la tasa de absorción de S durante el ciclo del cultivo de Soja, sus requerimientos y la fracción del nutriente que es exportada con los granos (índice de cosecha).

2- METODOLOGÍA UTILIZADA

En parcelas implantadas con este propósito, durante las campañas 1999/00 y 2001/02 se realizaron experimentos tendientes a determinar la curva de absorción de S en Soja. Durante el primer ciclo, se utilizó la variedad Nidera A 4100 RG, la que se sembró el día 6/11/1999 espaciada a 70 cm entre hileras y en labranza convencional. En el segundo año se utilizó la variedad Don Mario 3800 RR, sembrada en labranza convencional el día 27/11/2001 a una distancia de 52,5 cm entre hileras. En ambos casos la semilla fue inoculada, para que una eventual deficiencia de N no condicionara la absorción de S. Para asegurar un adecuado abastecimiento de S al cultivo, en ambas campañas se realizó una aplicación de 15

kg S ha⁻¹ en forma de Tiosulfato de Amonio (12-0-0-26S). Dada su formulación líquida, el fertilizante se aplicó chorreado en el centro de los entresurcos. En la campaña 1999/00 el fertilizante fue agregado 15 días antes de la siembra, mientras que en el ciclo 2001/02 la aplicación se realizó al estado de “cracking” (inicio de la emergencia).

A lo largo del período de cultivo se tomaron muestras de la parte aérea de plantas en cuatro sectores de 0,5 m² cada uno, a excepción del primer corte del año 1999 en el que las muestras extraídas fueron tres. Los muestreos se realizaron en sitios con densidad uniforme de plantas, cortando las mismas a ras del suelo, en los siguientes estadios fenológicos (Fehr y Caviness, 1977): V3 (tres hojas expandidas), R2 (plena floración), R5 (inicio de formación de granos), R7 (al menos una vaina amarillenta en el tallo principal) y R8 (madurez de cosecha). Las plantas enteras de cada corte fueron separadas en hojas (láminas + pecíolos) y tallos (V3 y R2); hojas (láminas + pecíolos), tallos y vainas (R5); hojas (láminas + pecíolos), tallos, vainas y granos (R7); y tallos, vainas y granos (R8). Las hojas y pecíolos caídos producto de la senescencia fueron recolectados en R7, pero no en R8. Las diferentes submuestras fueron secadas hasta peso constante en estufa de circulación forzada a 60 °C, pesadas con balanza de precisión < 0,01 g y después molidas en un molino tipo Willey (< 1 mm). Finalmente, para cada una de ellas se calculó la materia seca producida por unidad de superficie y se determinó el contenido de S [digestión con ácido nítrico y ácido perclórico, determinación por turbidimetría, de acuerdo con la metodología descrita por Lisle et al., 1994)].

Esta evaluación permitió cuantificar la acumulación de materia seca y de S durante el ciclo de la Soja, y la exportación del nutriente con el grano cosechado.

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.a- ACUMULACIÓN DE MATERIA SECA Y S EN SOJA

En las Tablas 7 y 8 se detalla la acumulación de materia seca en diferentes órganos de la planta para las campañas 1999/00 y 2001/02, respectivamente.

Tabla 7- *Acumulación de materia seca (kg ha^{-1}) en diferentes estadios fenológicos de la Soja. Campaña 1999/00. Valores promedio de cuatro muestras (tres en el estadio V3).*

	Estadio				
	V3	R2	R5	R7	R8
Hojas	215	462	1963	1982	
Tallos	63	181	1107	1268	1352
Vainas			403	1288	1180
Granos				2811	3160
M Seca Total	278	643	3473	7349	5692

Tabla 8- *Acumulación de materia seca (kg ha^{-1}) en diferentes estadios fenológicos de la Soja. Campaña 2001/02. Valores promedio de cuatro muestras.*

	Estadio				
	V3	R2	R5	R7	R8
Hojas	239	1420	3359	1657	
Tallos	64	581	1888	1735	1775
Vainas			1339	1423	1497
Granos				3475	4712
M Seca Total	303	2001	6586	8290	7984

La productividad alcanzada fue diferente en los dos años. Mientras en la campaña 1999/00 el cultivo estuvo afectado por una moderada sequía que condicionó su desarrollo, en el ciclo 2001/02 los niveles de crecimiento y rendimiento logrados fueron óptimos. La máxima acumulación de materia seca en grano se alcanzó recién en R8. En cambio, en R7 se registró la máxima acumulación de materia seca total, debido a que en este estado todavía no se había producido la senescencia foliar del cultivo.

En las Tablas 9 y 10 se presentan los valores de concentración de S determinados en ambas campañas para los diferentes momentos de corte y órganos de la planta. Como tendencia general, se observa una paulatina disminución en el contenido de S a medida que transcurre el ciclo del cultivo. Para la campaña 1999/00, esto se debió a que la absorción de S se anticipó a la acumulación de materia seca. Luego, el crecimiento de la planta diluyó la concentración del nutriente en los tejidos. Para los dos años de ensayo además se explica por la diferente proporción de tejidos: a comienzos del ciclo hay mayor proporción de hojas, que contienen más S que los tallos. Tanto en hojas como en tallos debe agregarse como factor adicional la translocación de S hacia vainas y granos durante el período reproductivo.

Tabla 9- Concentración de S (%) en órganos vegetativos y reproductivos durante el ciclo de la Soja. Campaña 1999/00. Promedio de cuatro muestras (tres en el estadio V3).

	Estadio				
	V3	R2	R5	R7	R8
Hojas	1,65	0,69	0,40	0,14	
Tallos	1,33	1,08	0,35	0,11	0,14
Vainas			0,38	0,06	0,10
Granos				0,30	0,37

Tabla 10- Concentración de S (%) en órganos vegetativos y reproductivos durante el ciclo de la Soja. Campaña 2001/02. Promedio de cuatro muestras.

	Estadio				
	V3	R2	R5	R7	R8
Hojas	0,20	0,19	0,20	0,11	
Tallos	mp	0,16	0,15	0,14	0,06
Vainas			0,20	0,11	0,06
Granos				0,24	0,23

mp: muestra perdida por disponerse de una cantidad insuficiente para realizar el análisis químico.

La bibliografía presenta en general valores de determinaciones foliares en láminas sin pecíolos, las cuales tienen mayor concentración de S respecto de aquellas que lo incluyen, como este trabajo. Ferraris et al. (2001 *a*) observaron en V3 concentraciones de entre 0,13 y 0,15 % de S para tratamientos fertilizados. En inicios de floración (R1 o R2) se han observado valores de suficiencia en láminas foliares de 0,24 % (Flannery, 1989), 0,25 % (Martins, citado por Yamada, 1999), o rangos de suficiencia de 0,21 a 0,40 % (Sfredo et al., 1986). En nuestro país, Galarza et al. (2000) han observado concentraciones de 0,15 a 0,18 % en parcelas

fertilizadas con S, y Fontanive et al. (1996) un rango de 0,19 a 0,31 % S en diferentes variedades de grupo V de maduración. En el estadio R5 Ferraris et al. (2001 *a*) observaron concentraciones de 0,30-0,31 %, y Fontanive et al. (1996) un rango de 0,14-0,20 % en las condiciones antes comentadas. Como ya fuera expresado, todas las determinaciones mencionadas en la bibliografía corresponden a hojas sin pecíolos, a excepción de los valores mencionados por Fontanive et al, (1996).

Además de las determinaciones foliares, los granos son un órgano comúnmente analizado para evaluar su concentración. Deloch, (citado por Marschner, 1995) y Hoefl y Fox (1986) mencionan porcentajes de S en grano de 0,32 y 0,19, respectivamente. Lavado et al. (2001) determinaron concentraciones en un rango de 0,22-0,26 %. González (2000), considerando el promedio de 46 muestras de grano, sugiere una concentración media de 0,13 %. En general, los valores de la bibliografía se acercan más a los del segundo año (Tabla 10), aunque se observa una gran variabilidad, lo cual se explica por los bajos requerimientos de S de los cultivos (comparado con los de N o K). Esto permite que, ante disponibilidades muy elevadas de S, haya consumo de lujo y el nutriente se acumule en los tejidos en una concentración que puede superar varias veces la necesaria para un crecimiento normal.

En las Figuras 1 y 2 se muestra la acumulación de materia seca total y discriminada para los diferentes órganos de la planta.

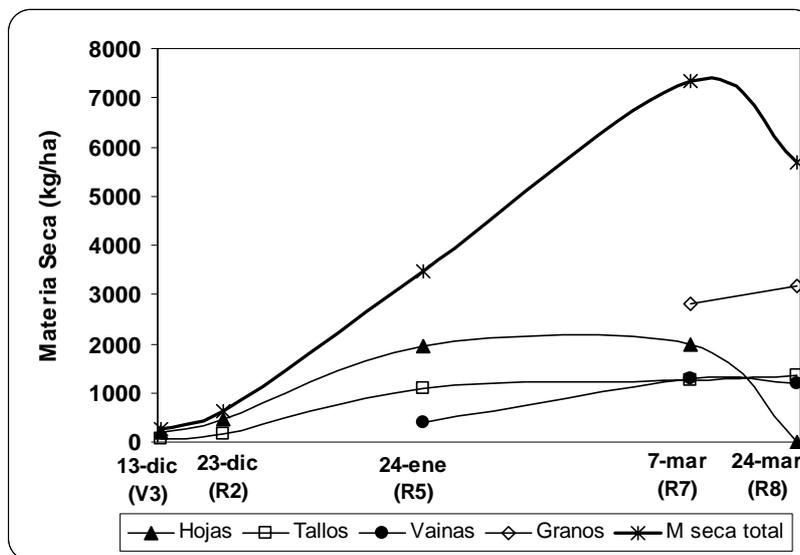


Figura 1- Acumulación de materia seca total y en diferentes órganos de la planta de Soja. Valores promedio de tres muestras (Estado V3) y cuatro muestras (R2, R5, R7 y R8). Campaña 1999/00.

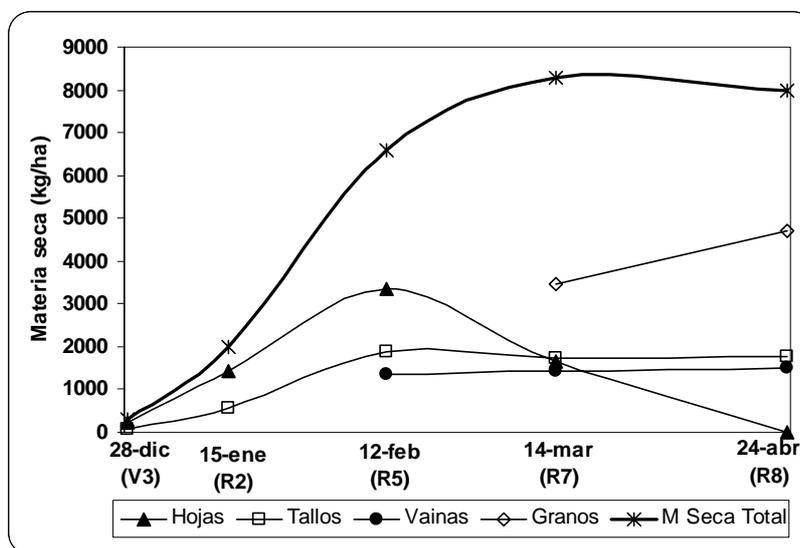


Figura 2- Acumulación de materia seca total y en diferentes órganos de la planta de Soja. Valores promedio de cuatro muestras. Campaña 2001/02.

Puede advertirse que la acumulación de materia seca es muy escasa hasta floración, y posteriormente comienza a incrementarse en forma sostenida hasta

R7, siguiendo una tendencia lineal para la campaña 1999/00 y ligeramente curvilínea en la campaña 2001/02. Entre R7 y R8, en cambio, se observa una disminución en la materia seca total debido a la pérdida del área foliar, compensada en parte por la fase final de acumulación de materia seca (“llenado”) en los granos.

Basándose en los datos de acumulación de materia seca y de concentración de S, se calculó la acumulación del nutriente en las distintas estructuras de la planta a lo largo del ciclo del cultivo para ambos años de ensayos (Figuras 3 y 4). En la campaña 2001/02, la concentración de S en tallos no pudo determinarse en el estado V3, ya que la cantidad de muestra disponible era insuficiente para realizar el análisis químico. Por lo tanto, el S acumulado se estimó asignándole igual proporción en relación con el contenido de S foliar registrado durante el muestreo de 1999/00. Es decir, en el experimento de la campaña 1999/00 el S acumulado en tallos ($0,84 \text{ kg ha}^{-1}$) alcanzó en el estado V3 al 23,7 % del S incorporado en las hojas ($3,55 \text{ kg ha}^{-1}$). Entonces, si en la campaña 2001/02 se determinó una acumulación de $0,48 \text{ kg ha}^{-1}$ en las hojas, respetando las mismas proporciones, el S incorporado en los tallos para el mismo estado alcanzaría solamente a $0,11 \text{ kg ha}^{-1}$.

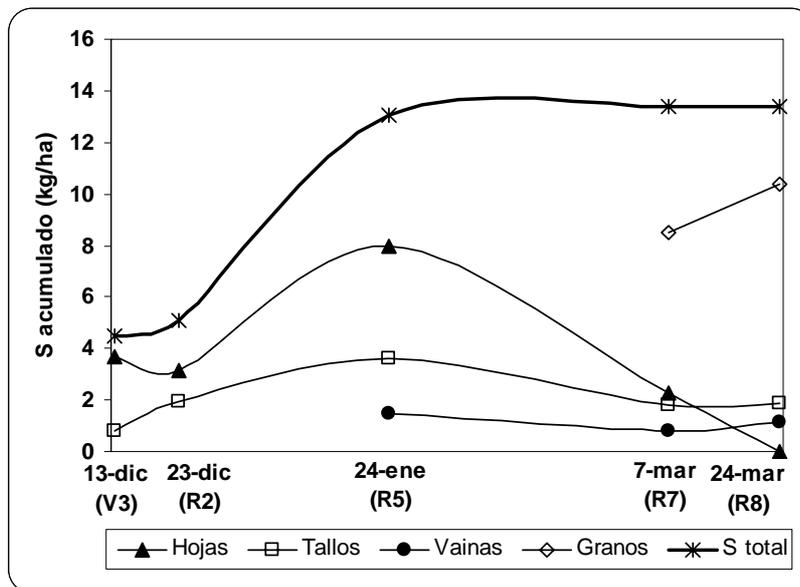


Figura 3- Acumulación de S en planta entera y en diferentes órganos del cultivo de Soja. Valores promedio de tres muestras (Estado V3) y cuatro muestras (R2, R5, R7 y R8). Campaña 1999/00.

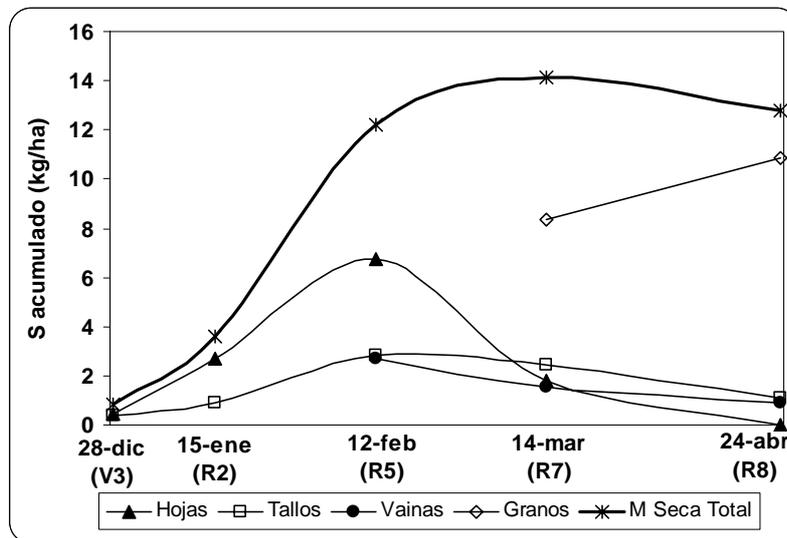


Figura 4- Acumulación de S en planta entera y en diferentes órganos del cultivo de Soja. Valores promedio de cuatro muestras. Campaña 2001/02.

Se determinó una tendencia hacia una acumulación de S anticipada a la de materia seca durante la campaña 1999/00, aunque en 2001/02 las curvas no muestran evidencias de adelantarse una respecto de la otra. La fase de más rápida absorción se inicia alrededor de R2, y alcanza valores iguales (campaña 1999/00) o cercanos al máximo (campaña 2000/01) ya en el estadio R5. Durante este período (R2-R5) se registraron en ambos años las máximas tasas de absorción ($0,25$ y $0,31$ kg S ha⁻¹ día⁻¹ para las campañas 1999/00 y 2001/02, respectivamente), producidas por la suma de acumulación en hojas y tallos, en coincidencia con lo observado por Scheiner et al. (2000). Hasta R5 el S se reservó en hojas, tallos y vainas, para translocarse después hacia los granos en crecimiento mayormente a partir de las hojas. Como se desprende de las Figuras 3 y 4, las vainas se transforman rápidamente de órganos destino a fuentes de nutrientes para los granos en formación. Si bien la frecuencia de muestreo no fue suficiente como para detectar la fase de incremento, a partir de R5 puede visualizarse una paulatina disminución en el contenido de S de estos órganos, aunque el valor determinado para R8 durante la campaña 2001/02 no se corresponde con esta tendencia. El temprano cambio en el balance de asimilación – exportación de nutrientes por parte de las vainas fue también informado por Sunarpi y Anderson (1997).

3.b- REQUERIMIENTOS DE S DE LA SOJA

La absorción total de S alcanzó a $13,38$ y $14,16$ kg ha⁻¹ en el estadio R7, y $14,76$ y $12,80$ kg ha⁻¹ en el estadio R8 para las campañas 1999/00 y 2001/02, respectivamente. Como ocurriera con la materia seca, la pérdida del S incorporado

en los órganos vegetativos (principalmente hojas) entre R7 y R8 fue compensada parcial o totalmente por la acumulación de S en grano, que continuó incrementándose hasta la madurez de cosecha del cultivo.

En la Tabla 11 se muestran los requerimientos de S determinados en ambas campañas.

Tabla 11- *Producción de materia seca total y en grano, requerimientos y exportación de S del cultivo de Soja. Los valores corresponden al estado R8, para los cultivares Nidera A 4100 RG (campaña 1999/00) y Don Mario 3800 RR (campaña 2001/02).*

	Campaña 1999/00	Campaña 2001/02
Materia seca total (kg ha⁻¹)	5692	7984
Materia seca de grano (kg ha⁻¹)	3160	4712
Absorción total de S (kg ha⁻¹)	14,76	12,80
Requerimientos de S (kg t⁻¹ de m seca total)	2,59	1,60
Requerimientos de S (kg t⁻¹ de m seca en grano)	4,67	2,72
Exportación de S de la parcela (kg ha⁻¹)	11,69	10,84
Índice de cosecha aparente de S	0,79	0,85
Exportación de S con los granos (kg t⁻¹ de materia seca en grano)	3,70	2,30

Los requerimientos de S cuantificados en el segundo año de estos experimentos son muy cercanos a los reportados en nuestro país por Scheiner et al. (2000) y al derivado de Hoefl y Fox (1986). En cambio, en la experiencia de la campaña 1999/00 los requerimientos fueron algo mayores, y podrían atribuirse a

cierto consumo de lujo derivado de un cultivo de menor productividad, con limitantes para el rendimiento (déficit hídrico) pero buena disponibilidad de S. Para la campaña 2001/02, habría que descartar una posible deficiencia de S como causa de los bajos requerimientos señalados, ya que se trató de una parcela fertilizada con una dosis mayor a la cantidad de S que después fue absorbida en la parte aérea de la planta. Lotes con deficiencia de S podrían presentar una demanda del nutriente por unidad de biomasa menor aún de la que ha sido determinada en estos experimentos.

Los requerimientos aquí presentados son sensiblemente inferiores al valor comúnmente aceptado de 7 kg de S acumulados en biomasa por t de grano producido (García, 2000), y podrían contribuir a explicar la escasa frecuencia de respuesta observada en los experimentos de esta red, como se detalla en el **Capítulo IV**. En cambio, los índices de cosecha de S son muy altos, mayores al presentado por García (2000), y muy superiores a los mencionado para otros cultivos, de 0,45 en Maíz, 0,38 en Girasol y 0,25 en Trigo (García, 2000; Ferraris, 2001).

3.C- CURVAS DE DILUCIÓN DE S EN SOJA

Con los datos de acumulación de materia seca y contenido de S se puede elaborar la curva de dilución del nutriente, la que indica la mínima concentración necesaria del mismo para alcanzar una cantidad de biomasa y un rendimiento dados. Esta concentración es denominada concentración crítica, y varía de acuerdo a la biomasa aérea acumulada y al nivel de rendimiento que finalmente alcance el cultivo. Tales curvas han sido utilizadas para diagnosticar deficiencias

de N en Maíz (Andrade et al., 1996) y Girasol (Merrien, 1992; Sosa et al., 1999). Sin embargo, aunque ha sido mucho menos estudiado, podrían ser utilizadas también para otros nutrientes y otros cultivos (Andrade et al., 1996). En general, definido un determinado nivel de productividad, dentro de una misma especie estas curvas son válidas para diferentes ambientes (Greenwood et al., 1990).

Las curvas de dilución para estos experimentos fueron graficadas hasta R7, que es el estadio fenológico en que el cultivo alcanzó el valor máximo de materia seca total. En las Figuras 5 y 6 se muestran, para ambas campañas, las curvas de dilución de S en función de la biomasa aérea total y de la biomasa de hojas (láminas más pecíolos), respectivamente. El porcentaje de S graficado en cada figura se determinó calculando el promedio ponderado de la concentración de S en cada órgano por el peso seco relativo de ese órgano en relación al peso seco total.

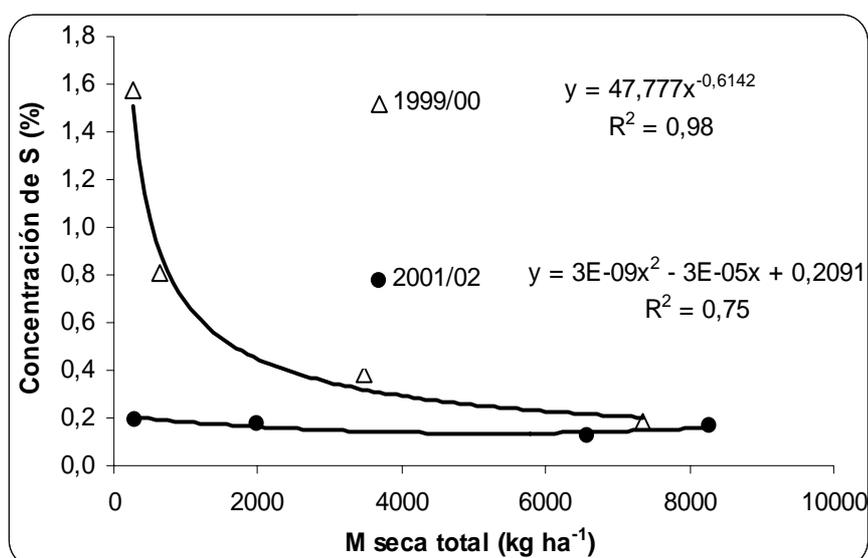


Figura 5- Concentración de S en biomasa aérea en función de la materia seca acumulada. Campañas 1999/00 (triángulos vacíos) y 2001/02 (círculos llenos).

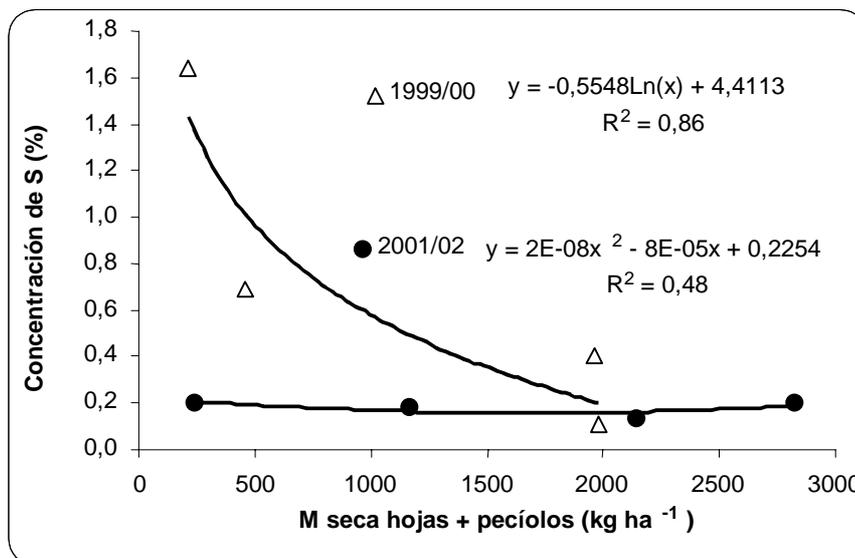


Figura 6- Concentración foliar de S en función de la materia seca acumulada en hojas más pecíolos. Campañas 1999/00 (triángulos vacíos) y 2001/02 (círculos llenos).

Los valores de concentración de S en función de la materia seca se ajustaron por regresión, utilizando los programas Microsoft Excel 2000 y Table Curve 2D Windows versión 7. Se evaluaron ecuaciones de tipo lineal simple, logarítmica, potencial, exponencial, Mitscherlich y polinomial de segundo orden, seleccionándose la función que maximizó el coeficiente de determinación (R^2). Los valores obtenidos para la campaña 1999/00 presentan un muy buen ajuste ($R^2=0,98$) con una función potencial decreciente. En cambio, en la campaña 2001/02 una ecuación cuadrática sólo logro un ajuste de $R^2=0,75$ debido a la menor pendiente de la curva (Figura 5). La curva de dilución de S en hojas mostró un ajuste menor en ambas campañas (Figura 6), manteniendo la tendencia a una pendiente decreciente y con mayor correlación para el primer año de ensayos, y de inferior valor para el segundo. Otros autores, trabajando con N en Soja y otras

especies, han encontrado una tendencia decreciente tal como se determinó para la campaña 1999/00 (Grenwood et al., 1990; Andrade et al., 1996). Claramente, ambas campañas representan dos poblaciones de datos diferentes, ya que en el ciclo 2001/02 con una menor concentración de S para cada nivel de biomasa inferior a 7000 kg ha⁻¹ se podría obtener un rendimiento un 50 % superior al de la campaña 1999/00. Entre las causas que podrían explicar este comportamiento, puede mencionarse el diferente nivel de productividad alcanzado y, especialmente, la diferente tasa de crecimiento observada en ambas campañas. En el ciclo 2001/02, la tasa de acumulación de materia seca alcanzó a 9,8; 94,4 y 163,8 kg ha⁻¹ día⁻¹ para los períodos Siembra-V3, V3-R2 y R2-R5, respectivamente, frente a 7,5; 36,6 y 88,4 kg ha⁻¹ día⁻¹ para las mismas etapas en el ciclo 1999/00. La tasa de acumulación de S para los mencionados períodos fue de 0,03, 0,15 y 0,31 kg ha⁻¹ día⁻¹ en la campaña 2001/02, y de 0,12; 0,06 y 0,25 kg S ha⁻¹ día⁻¹ en el ciclo 1999/00. Scheiner et al. (2000) observaron una dinámica similar a la registrada en la campaña 2001/02, aunque las tasas máximas determinadas por estos autores no superaron los 0,20 kg S ha⁻¹ día⁻¹. Cabe destacar que mientras la tasa de crecimiento para los períodos antes mencionados fue en promedio un 91 % superior en la campaña 2001/02, la tasa de acumulación de S solamente se incrementó en un 38 % respecto del primer año de ensayos. El aumento relativamente mayor en la tasa de crecimiento explicaría entonces una dilución superior y por ende una menor concentración de S en los tejidos de la planta, sobre todo en las etapas iniciales del ciclo, tal como se determinó en la campaña 2001/02. Desde R5 a R7 la tendencia se invirtió, siendo la tasa de

acumulación de materia seca superior para la campaña 1999/00 ($90,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ vs $56,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ para la campaña 2001/02). Este hecho, junto a una tasa de absorción de S de escasa magnitud para dicho período en ambas campañas, habría sido el motivo por el cual las curvas de dilución se acercaron alrededor del valor de 7000 kg ha^{-1} de materia seca, el que fue alcanzado a comienzos del período R5-R7 durante el ciclo 2001/02, y hacia finales del mismo en la campaña 1999/00.

4- CONCLUSIONES

- Los requerimientos de S determinados durante las campañas 1999/00 y 2001/02 fueron de $4,67$ y $2,72 \text{ kg S t}^{-1}$ de grano, respectivamente, en cultivares de Soja de ciclo corto. Los valores del primer año podrían considerarse cercanos al promedio del rango que menciona la literatura. Los del segundo año, en cambio, se encuentran entre los más bajos, pero son similares y aún superiores a los determinados localmente. La diferencia entre ambos experimentos podría atribuirse a cierto consumo de lujo por parte de la Soja cultivada en la campaña 1999/00.
- El índice de cosecha aparente (sin considerar hojas caídas) de S fue de $0,79$ para la campaña 1999/00 y $0,85$ para la campaña 2001/02, ambos notablemente superiores a los reportados para S en otros cultivos. La exportación de S alcanzó a $3,70$ y $2,30 \text{ kg S t}^{-1}$ de grano, para los ciclos 1999/00 y 2001/02, respectivamente.
- Durante la campaña 1999/00 el cultivo debió incorporar $14,76 \text{ kg S ha}^{-1}$ para producir 3160 kg ha^{-1} de grano. En el experimento de la campaña 2001/02, en cambio, se necesitaron $12,80 \text{ kg ha}^{-1}$ de S para producir 4711 kg ha^{-1} de grano. A la luz de estos resultados, la exigencia de S del cultivo ha sido frecuentemente

sobreestimada, y podría explicar la baja frecuencia de respuesta observada en esta red de ensayos (**Capítulo IV**).

➤ La dinámica de absorción de S varió sustancialmente entre ambas campañas. En el ciclo 1999/00 se acumuló en alta concentración en hojas y tallos durante los primeros estadios de desarrollo, disminuyendo luego rápidamente a medida que se redistribuía hacia los destinos reproductivos. La acumulación de S fue anticipada a la de materia seca, y hubo una marcada dilución de la concentración del nutriente en los tejidos, de acuerdo con una función potencial decreciente. En la campaña 2001/02, en cambio, si bien pudo observarse la translocación desde hojas y tallos hacia los destinos reproductivos, la concentración máxima de S alcanzada en los primeros estadios fue mucho menor que en el primer año, y recién se pudo detectar una disminución de la concentración del nutriente hacia la madurez del cultivo. Como consecuencia, la acumulación de materia seca y S fueron más sincrónicas, y a lo largo de todo el ciclo prácticamente no se observó dilución del nutriente, cuya concentración siguió una tendencia de tipo cuadrática.

CAPITULO IV

**CARACTERIZACION DE LA RESPUESTA A S. EVALUACION DE LOS
ANALISIS DE SUELO COMO HERRAMIENTA DE DIAGNOSTICO**

1- INTRODUCCIÓN

Los análisis de suelo son una herramienta tradicional, comúnmente utilizada para la detección de deficiencias en prácticamente todos los nutrientes minerales necesarios para el crecimiento de los cultivos. La obtención de un método para el diagnóstico de fertilidad azufrada en Soja de primera basado en el análisis de suelo, tendría como ventaja su practicidad, el conocimiento generalizado que existe sobre la forma de tomar correctamente las muestras (de relevante importancia en el resultado final de dichos análisis), por ser una práctica habitual entre los productores y asesores, y el mérito de permitir aprovechar la infraestructura y el equipamiento del que disponen los laboratorios para el análisis de otros nutrientes (Ferrari et al., 1999 *b*). La determinación de sulfatos en suelos, un parámetro usualmente cuantificado para elaborar recomendaciones de fertilización, ha mostrado hasta el momento un escaso valor predictivo en la región pampeana, y no se dispone de un método de diagnóstico calibrado que establezca un nivel crítico por debajo del cual es probable una respuesta positiva al agregado de S. Sin embargo, en otros lugares del mundo esta prueba ha sido utilizada con éxito para predecir la respuesta a la fertilización (Anderson et al., 1992; Ajwa y Tabatabai, 1993; Blair et al., 1993; Zhao y Mc Grath, 1994; Watkinson y Kear, 1996; Prietzel y Hirsch, 2000). Para la toma de muestras de suelo destinadas a evaluar sulfatos, la profundidad de 60 cm se considera suficiente ya que el contenido no valorado por debajo se compensa con la ineficiencia de las raíces para absorber el 100 % del nutriente existente a esa profundidad (Johnson, 1987). Más aún, para otros nutrientes móviles en el suelo,

como es el caso del N, se ha encontrado una buena asociación entre la disponibilidad en superficie (0-20 cm) y a mayor profundidad (0-60 cm) (Alvarez y Alvarez., 2000).

Adoptando un enfoque alternativo, algunos autores sostienen que la mayor probabilidad de respuesta a la fertilización azufrada está asociada a cultivos de alto rendimiento, y en suelos arenosos y profundos, sin horizonte B textural (Johnson, 1987). También se han efectuado recomendaciones de fertilización con S sobre la base de condiciones texturales de suelo (Johnson, 1987), N aportado con el fertilizante (Johnson, 1987; Johnson y Fixen, 1990) y otros factores relacionados, pero sin precisar valores o rangos críticos para algún análisis en particular.

Por otra parte, tampoco se ha establecido que el contenido de sulfatos previo a la siembra sea la mejor manera de evaluar la capacidad del suelo para suministrar S a los cultivos. En otros países se ha propuesto la utilización de un índice que integra el contenido inicial de sulfatos en el suelo más una estimación del mineralizable determinada a partir de una incubación corta de ese mismo suelo (Jones, 1986; Messick, 1992; Ghani, 1994). Este enfoque se fundamenta en que alrededor del 95 % del S del suelo forma parte de compuestos orgánicos (Ericksen et al., 1998). La mayor parte de ese S esta ligado indirectamente al Carbono (C), por intermedio del Oxígeno (O) o del N (Blair et al., 1993; Marschner, 1995), constituyendo la fracción orgánica más lábil, capaz de tornarse rápidamente disponible para las plantas (Ericksen, 1997 *a, b*; Ericksen et al., 1998). Diversos procedimientos han sido utilizados para realizar estas incubaciones, variando entre

ellos respecto al tamaño de la muestra de suelo, al tiempo de incubación y a la extracción o no de los sulfatos a medida que éstos van siendo liberados a partir del S orgánico del suelo (denominadas en consecuencia incubaciones abiertas y cerradas, respectivamente). Otras diferencias se basan en la temperatura y humedad elegidas para la incubación, y en las condiciones aeróbicas o anaeróbicas en que las mismas se realizan. Cualquiera sea la metodología utilizada, debería cumplir algunos requisitos para ser utilizada como un criterio práctico de recomendación, a saber:

- Basarse en una técnica lo suficientemente ágil y sencilla como para ser reproducida en un laboratorio comercial.
- Tener bajo costo para permitir su adopción generalizada.
- Disponer de los resultados en un tiempo suficientemente breve, que permita planificar la fertilización sin tener para ello que tomar las muestras de suelo bajo condiciones ambientales muy diferentes a las que se presentarán al momento de realizar la siembra y aplicar los fertilizantes.

Estos estudios no tienen como finalidad cuantificar el S efectivamente mineralizado durante el ciclo o parte del ciclo de la Soja, sino tratar de establecer una buena correlación entre un índice que diferencie la capacidad de los diferentes suelos para mineralizar S y la respuesta a la fertilización con este nutriente.

El objetivo de este capítulo fue establecer las relaciones existentes entre diferentes variables de suelo y la respuesta de la Soja a la fertilización azufrada.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

2.a- ANÁLISIS DE SUELOS AL MOMENTO DE LA SIEMBRA

En todos los experimentos se realizó un muestreo inicial del suelo al momento de la siembra, tomándose muestras compuestas por bloque, a tres profundidades: 0-20, 20-40 y 40-60 cm. En algunos casos (7 sitios en total), sin embargo, se tomó una sola muestra compuesta por ensayo (sin tener en cuenta los bloques) para cada una de las tres profundidades mencionadas. Las muestras superficiales (0-20 cm) estuvieron compuestas por 20 submuestras, y las más profundas (20-40 y 40-60 cm) se integraron con 10 a 20 submuestras. Los análisis realizados sobre las muestras de 0-20 cm con objetivos de diagnóstico fueron: MO (Walkley y Black, 1934) y S-sulfatos [extracción por acetato de amonio, determinación por turbidimetría (Lisle et al, 1994)]. En las muestras de mayor profundidad se midió también el contenido de S-sulfatos [acetato de amonio y turbidimetría]. Para la mayor parte de los sitios experimentales, se consideró el fraccionamiento textural del horizonte A especificado en las cartas de suelo elaboradas por INTA. En 8 ensayos del primer año y en cuatro del segundo la caracterización textural se realizó en laboratorio [método de la pipeta de Robinson (Gee y Bauder, 1986)], debido a que los datos no fueron informados, o a que el sitio experimental no ha sido relevado a un nivel de detalle que permita la identificación de la respectiva serie de suelo. Con los valores de las fracciones granulométricas así obtenidas se calcularon las relaciones MO/arcilla, MO/limo y MO/(arcilla + limo). Las muestras de suelo fueron secadas en estufa de circulación forzada a 42 °C, molidas en un molino de martillos tipo Willey y

tamizadas por malla < 2mm, a excepción de un reducido grupo de muestras que fueron enviadas al laboratorio de análisis secadas, molidas y tamizadas por los propios investigadores.

2.b- EVALUACIÓN DE LA MINERALIZACIÓN DE S BASADA EN INCUBACIONES DE SUELOS

Con el objetivo de realizar una evaluación directa de la mineralización de S a partir de la fracción orgánica del suelo, durante el primer año se realizaron incubaciones de muestras superficiales (0-20 cm) en condiciones controladas de temperatura y humedad. Para dichas incubaciones se seleccionaron las muestras de suelo provenientes de 12 ensayos, elegidos por el bajo coeficiente de variación que presentaron en sus rendimientos (< 10 %), como así también por la amplia variabilidad en la textura de los suelos y en su ubicación geográfica. Este grupo comprendía asimismo un número equilibrado de ensayos con respuesta positiva y nula a la fertilización con S. El ensayo Marcos Juárez I-1 fue incluido por ser el sitio de la provincia de Córdoba con mayor diferencia positiva por el agregado de S, aunque esta respuesta no fuese significativa y el coeficiente de variación alcanzara al 14,46 % (Tabla 12). De cada uno de los sitios seleccionados, se incubó una submuestra de 20 g de suelo por bloque, correspondiente a una fracción del total de la muestra extraída al momento de la siembra. Previamente, se realizó en ellas una determinación inicial de la concentración de sulfatos, utilizando como extractante una solución de fosfato diácido de Potasio y la cuantificación de S-sulfatos en el extracto por turbidimetría (Lisle et al, 1994). Mediante este extractante se puede valorar el S-sulfatos en solución, el adsorbido

y parte de la fracción orgánica lábil (Jones, 1986; Sillem, 1998). El extractante utilizado fue diferente del que se empleó para realizar los análisis a la siembra. Esto se debió a que en el laboratorio en el que se realizaron los análisis al momento de la siembra no se contaba con un incubador que permitiera mantener constante la temperatura de las muestras. Por este motivo, las incubaciones se debieron realizar en otro laboratorio, el cual utilizaba como extractante de rutina para S al fosfato diácido de Potasio.

Sobre cada muestra de suelo, la extracción y el dosaje de S se realizó por triplicado. El suelo fue rehumedecido con agua destilada a 80 % de capacidad de campo, tal como sugieren Maynard et al, (1983), teniendo en cuenta la textura de la serie de suelos de cada ensayo, y perfectamente homogeneizado. Para establecer la cantidad de agua a agregar se tomó como referencia el contenido de humedad necesario para alcanzar la capacidad de campo, determinado en muestras de suelo de similar composición textural a las que iban a ser incubadas, y sobre este valor se calculó el 80 %. Para la incubación se utilizaron recipientes cilíndricos de plástico estéril resistente al calor con tapa a rosca y de un volumen de 100 ml. Los recipientes conteniendo las respectivas muestras de suelo fueron cerrados e incubados por 14 días, en un incubador que mantenía la temperatura constante a 30 °C a través de un termostato. Este período de tiempo sería el máximo que podría extenderse una incubación cerrada sin que los sulfatos liberados a partir de la MO inhiban la mineralización por producto (Maynard et al., 1983). Por otra parte, se eligió una temperatura relativamente alta para aumentar las tasas de mineralización y expandir las diferencias entre suelos

(Tabatabai y Al-Khafaji, 1980). A los 7 días de iniciada la incubación, los recipientes con las muestras fueron destapados durante 15 minutos para permitir la aireación de los suelos, evitando así condiciones de anaerobiosis (R. Alvarez, comunicación personal). Luego de transcurrido el período de incubación, las muestras se secaron en estufa de circulación forzada a 42 °C y se analizaron para sulfatos utilizando idéntica metodología a la empleada en la determinación inicial.

2.c- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS Y CÁLCULO DE LA RESPUESTA A S

Para estudiar la asociación entre variables de suelo y la expresión de la respuesta a S se utilizaron procedimientos de regresión lineal simple y regresión lineal múltiple (procedimiento Stepwise y análisis de multicolinealidad), por medio del programa estadístico Statistix 7. En el procedimiento Stepwise se evaluaron valores de significancia estadística de entrada y salida de variables de $\alpha=0,05$ y $0,10$. Cuando no se pudo establecer asociación entre la respuesta a la fertilización azufrada y una variable en particular a través de regresión, se intentó una separación de dos poblaciones (ensayos con y sin respuesta a S) por medio de una adaptación del método de los cuadrantes de Cate y Nelson (Cate y Nelson, 1965).

Los rendimiento de grano de cada ensayo fueron sometidos a análisis de varianza mediante el programa Statistix 7, y, en caso de detectarse efecto significativo de tratamiento ($P<0,10$), se realizaron comparaciones de medias a través del test LSD ($\alpha=0,10$). El nivel de significancia fue elegido considerando que es adecuado tomar la decisión de fertilizar un cultivo de Soja aún cuando existe un 10 % de probabilidad de no encontrar una respuesta positiva a esta

práctica. En todos los casos, la variable dependiente en estos análisis fue la respuesta en rendimiento de grano al agregado de S. La expresión de dicha respuesta en forma de rendimientos relativos al testigo no mejoró el ajuste de las variables ni permitió generar un modelo de mayor poder predictivo (datos no presentados). Si para el análisis de varianza de los rendimientos se elimina el tratamiento 4 (**T4**), el diseño toma la forma de un factorial y se puede calcular la interacción P x S. Esta interacción no fue estadísticamente significativa ($P=0,10$) en 25 de los 29 ensayos de la primera campaña (2000/01). Durante el segundo año de ensayos (2001/02), y tomando el mismo nivel de significancia, la interacción P x S no fue estadísticamente significativa en 16 de los 17 ensayos realizados. Algunos autores han mencionado mayores posibilidades de respuesta al S cuando se han cubierto los requerimientos de P (Darwich, 1998, 1999). Sin embargo, la interacción entre ambos nutrientes suele ser difícil de demostrar en condiciones de campo, más aún con niveles discretos de respuesta, y no pudo verificarse en la mayoría de los ensayos de esta red. Dos de los ensayos con interacción PxS estadísticamente significativa fueron eliminados del análisis (ver **3.a.2** y **3.b.2** de este capítulo). En los tres restantes, alguno de los tratamientos fertilizados presentó un rendimiento menor respecto de su testigo, sin que esto tuviera explicación aparente. Para atenuar los desvíos resultantes de este comportamiento sin eliminar tratamientos dentro de un ensayo, se procedió a calcular la respuesta de la misma manera que en los sitios sin interacción PxS, es decir como un promedio de las diferencias entre los tratamientos que recibieron S y aquellos que no lo recibieron en ambas situaciones de fertilización con P:

$$\text{Respuesta a S} = [(T2-T0) + (T3-T1)]/2$$

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.a- ENSAYOS CAMPAÑA 2000/01

3.a.1- RESULTADOS GENERALES DE LA RED: RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN AZUFRADA EN SOJA

Los rendimientos promedios de cada uno de los ensayos de la campaña 2000/01, así como la respuesta media a S (calculada como se detalla en el punto 2.c de este capítulo) y su significancia estadística, se describen en la Tabla 12.

Tabla 12- Rendimiento de grano, significancia estadística, coeficiente de variación (C.V.) y respuesta media a la fertilización con S. Ensayos campaña 2000/01. Los rendimientos son promedio de cuatro repeticiones (tres en Pergamino I-1, Maracó, Catriló I-1, Catriló I-2 y Capital I-1). Respuesta a S = $[(T2-T0)+ (T3-T1)]/2$. Para un mismo sitio, los rendimientos seguidos de diferentes letras difieren significativamente (LSD, $\alpha=0,10$).

Partido/ Departamento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)					Anova P > F	C.V. (%)	Resp S (kg ha ⁻¹)
	T0	T1	T2	T3	T4			
1. San Jerónimo I-1	3077 d	3543 b	3379 c	3703 a	3626 ab	0,0000	3,11	231
2. Las Colonias	2655 c	3119 b	3019 b	3308 a	3272 a	0,0000	3,81	277
3. Belgrano I-1	3782 c	4011 b	4224 a	4197 ab	4125 ab	0,0092	3,75	314
4. Paraná I-1	2789	2907	2709	2801	3042	0,1294	6,06	-93,1
5. Paraná I-2	2592	2901	2475	2632	2544	0,5516	13,97	-193
6. Río Cuarto I-1	919	1076	1016	996	993	0,6841	14,76	9
7. Marcos Juárez I-1	2397	2512	2802	2710	2784	0,5083	14,46	302
8. Marcos Juárez I-2	3831	3721	3835	3533	3306	0,2272	9,66	-92
9. Iriondo	4512	4420	4535	4466	4543	0,5130	2,48	35
10. Caseros	3631 b	3631 b	3666 b	3772 a	3772 a	0,0261	2,02	88
11. General López	3495	3690	3579	3777	3610	0,1552	4,18	86
12. Colón I-1	3370	3684	3583	3666	3715	0,5602	8,77	98
13. Pergamino I-1	4117	4025	3965	4003	4037	0,9928	10,13	-87
14. Pergamino I-2	3536	3550	3350	3596	3832	0,2255	7,52	-70

(continúa...)

Tabla 12- (continuación)

Partido/ Departamento	Rendimientos (kg ha ⁻¹)					Anova P > F	C.V. (%)	Resp S (kg ha ⁻¹)
	T0	T1	T2	T3	T4			
15. S. A. de Areco I-1	3550	3500	3125	3608	3675	0,8460	21,14	-158
16. S. A. de Areco I-2	3209	3342	3250	3900	3400	0,1915	12,11	300
17. Rojas	4042	4045	4071	4108	4193	0,1787	2,23	46
18. Junín I-1	2397 b	2930 a	2562 b	3112 a	3189 a	0,0012	8,05	174
19. Junín I-2	2591 c	3227 a	2763 c	3042 ab	2853 bc	0,0089	7,22	-7
20. 9 de Julio I-1	4066 c	4527 a	4464 ab	4174 bc	4469 ab	0,0631	5,49	23
21. 9 de Julio I-2	3498	3614	3178	3682	3487	0,1374	7,05	-126
22. Tandil I-1	2622 b	3110 a	2501 b	2964 a	3039 a	0,0019	5,78	-134
23. Tandil I-2	2612 ab	2811 a	2360 b	2856 a	2784 a	0,0320	7,34	-103
24. Rivadavia	3963	4090	3927	4050	4081	0,1770	3,96	-39
25. Trenque Lauquen	3582	3520	3665	3376	3110	0,3167	9,42	-30
26. Maracó	596	629	647	709	558	0,8565	5,01	65
27. Catriló I-1	3623	3314	3166	4028	3105	0,1026	63,20	129
28. Catriló I-2	3565 a	3032 b	3472 ab	3910 a	3753 a	0,0967	9,92	393
29. Capital I-1	3266	3683	3454	3719	3630	0,9145	19,20	112

Durante el primer año de ensayos se registraron aumentos significativos de rendimiento ($P < 0,10$) debido al agregado de S en seis de los sitios evaluados. En dos casos correspondieron a diferencias entre los tratamientos T3 y T1, en otros dos surge de comparar T2 vs T0, y en los dos restantes se observaron incrementos significativos de rendimiento en ambas comparaciones. Como ya se mencionara en el punto **2.c**, la respuesta a la aplicación de S se mostró mayoritariamente independiente de la fertilización con P.

Analizando la respuesta promedio, puede apreciarse que en seis sitios el agregado de S incrementó los rendimientos en más de 200 kg ha^{-1} , y en cuatro de ellos el aumento fue superior a 300 kg ha^{-1} . Claramente, se observa un predominio de sitios de no respuesta (respuestas inferiores a 200 kg ha^{-1} o aún negativas) a la fertilización azufrada. El mayor número de ensayos con respuesta positiva se observó en el centro-sur de Santa Fe, precisamente donde se reportaron los primeros resultados favorables debido a esta práctica (Martínez y Cordone, 1998). Cuatro de los seis experimentos realizados en dicha provincia mostraron diferencias significativas ($P < 0,10$) a favor de los tratamientos fertilizados.

En la Figura 7 se presenta la respuesta media a S sin agregado de P (Figura 7.a) o con fertilización fosfatada de base (Figura 7.b), con sus respectivas desviaciones estándar.

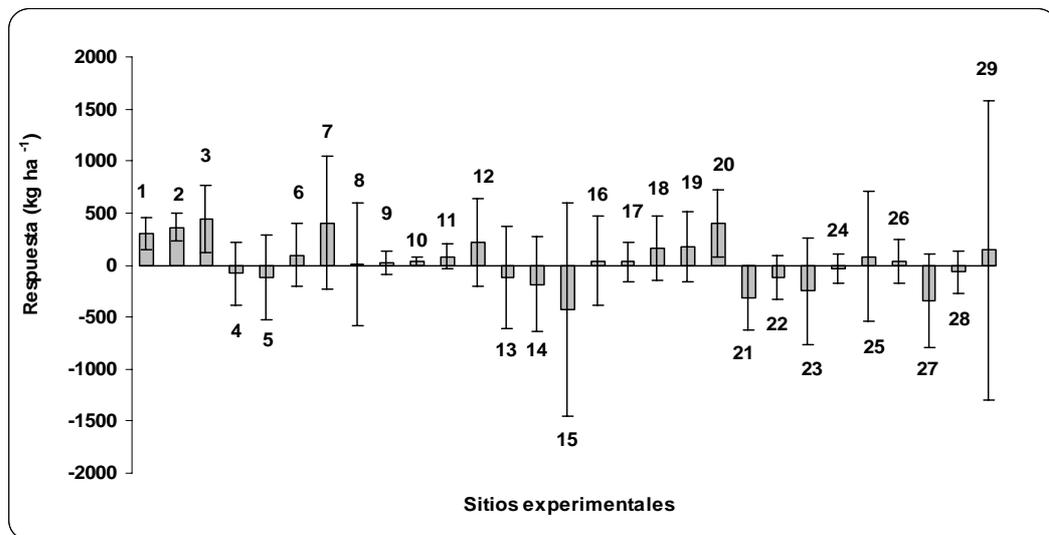


Figura 7.a.

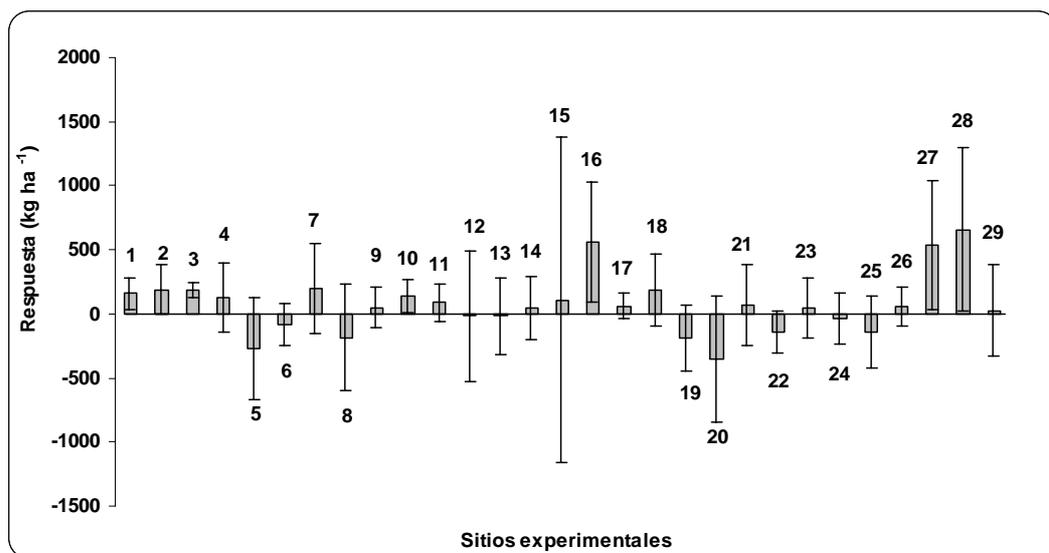


Figura 7.b.

Figura 7- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera sin agregado de P (a) o con agregado de P (b). Ensayos campaña 2000/01. Los números corresponden a los sitios presentados en la Tabla 1. Las barras grafican la respuesta media y las líneas verticales representan la desviación estándar respecto de la media.

Puede visualizarse la escasa respuesta a S verificada en esta red. Comparando los tratamientos sin fertilización fosforada de base (Figura 7.a), sólo en cuatro sitios (San Jerónimo I-1, Las Colonias, Belgrano I-1 y 9 de Julio I-1) las respuestas medias positivas (Respuesta sin P = Rendimiento T2-Rendimiento T0), superaron a la desviación estándar de la muestra (las líneas de dispersión no cruzan el valor de cero respuesta). Cuando se consideran los tratamientos con agregado de P (Figura 7.b), en 6 ensayos (San Jerónimo I-1, Belgrano I-1, Caseros, San Antonio de Areco I-2, Catriló I-1 y Catriló I-2) las respuestas medias (Respuesta sin P = Rendimiento T2-Rendimiento T0) superaron a los desvíos estándar. La escasa frecuencia y magnitud de la respuesta a la fertilización con S observada en esta red fue la principal limitación para la evaluación de las herramientas de diagnóstico probadas.

3.a.2- PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA A S EN BASE A VARIABLES DE MANEJO

Para el análisis de los datos de la campaña 2000/01, se excluyeron los sitios Río Cuarto I-1 (afectado por una intensa sequía) y Maracó (dañado por granizo), ambos con niveles muy bajos de productividad (Tabla 12). Tampoco fue considerado el ensayo Catriló I-1 debido a la magnitud del error experimental observado en la evaluación de rendimiento (C.V.=63,2 %).

Los análisis realizados a través de ANOVA de una vía, utilizando como categóricas a distintas variables de manejo, determinaron que no hubieron diferencias de respuesta determinadas por el cultivo antecesor (P=0,76), el sistema de labranza (P=0,84) (Tabla 3) o la variedad utilizada (P=0,57) (Tabla 5).

Tampoco hubo relación de la respuesta a S con los años de agricultura continua desde la última pradera (Tabla 3), tal como se muestra en la Figura 8. Esta variable tiene como desventaja su ambigüedad y dudosa precisión. La información sobre la historia agrícola de los lotes fue proporcionada por los mismos productores, y pocos de ellos registran la secuencia de cultivos de sus establecimientos, debiendo por consiguiente apelar a la memoria. La incertidumbre es aún mayor cuando se trata de lotes con un extenso período bajo agricultura, y en los campos en alquiler donde la tenencia del mismo frecuentemente cambia a través de los años.

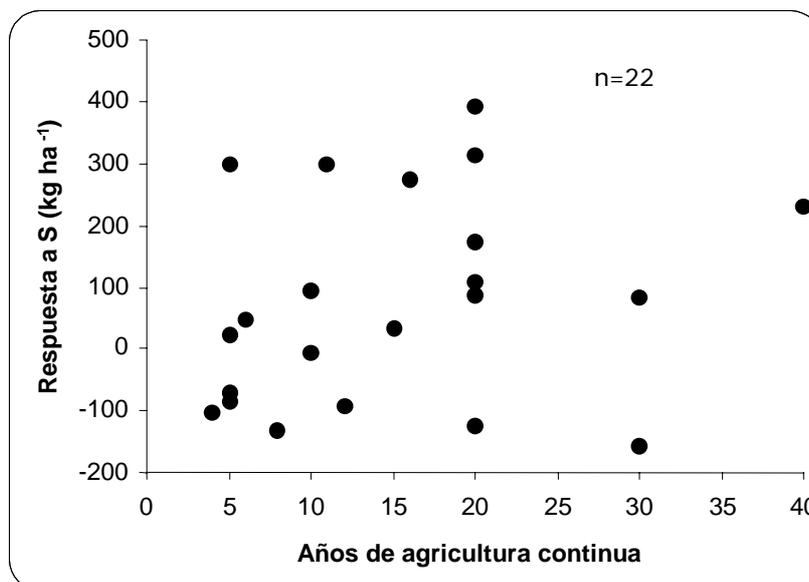


Figura 8- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de los años de agricultura continua desde la última pradera. Ensayos campaña 2000/01. Los datos de la historia agrícola de los sitios fueron suministrados por los propios productores. Se presenta la información proveniente de 22 sitios: se eliminaron del análisis los ensayos Río Cuarto I-1, Maracó y Catriló I-1 (ver punto 3.a.2), y a estos se le suman los cuatro sitios sin información de años de agricultura (Tabla 3).

3.a.3- PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA A S EN BASE A PARÁMETROS DE SUELO EVALUADOS A LA SIEMBRA

La Tabla 13 muestra los datos de las variables de suelo que fueron evaluadas con el objetivo de predecir la respuesta a S en cada uno de los ensayos de la campaña 2000/01.

Tabla 13- Variables de suelo evaluadas a la siembra con objetivo de diagnóstico de la fertilidad azufrada en Soja de primera.

Ensayos campaña 2000/01. Los valores presentados son promedio de las repeticiones de cada ensayo.

Partido/ Departamento	MO (%)	S-SO ₄ ²⁻ 0-20 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 20-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 40-60 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 0-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 0-60 cm (mg kg ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	MO/arcilla	MO/(arcilla + limo)
1. San Jerónimo I-1	2,84	11,30	10,10	10,10	10,70	10,50	25,00	72,50	0,144	0,029
2. Las Colonias	2,26	14,70	9,30	9,40	12,00	11,13	28,70	66,70	0,079	0,024
3. Belgrano I-1	2,98	10,20	8,10	8,90	9,15	9,07	26,54	70,52	0,112	0,031
4. Paraná I-1	3,20	14,10	13,00	13,80	13,55	13,63	47,70 (**)	49,70 (**)	0,067	0,033
5. Paraná I-2	2,68	10,80	13,40	21,30	12,10	15,17	43,60 (**)	49,90 (**)	0,061	0,029
6. Río Cuarto I-1 (*)	2,67	12,60	12,50	9,90	12,55	11,67	14,00	38,00	0,191	0,051
7. Marcos Juárez I-1	2,84	8,90	7,30	8,50	8,10	8,23	25,70	69,77	0,111	0,030
8. Marcos Juárez I-2	2,84	10,20	8,90	7,90	9,55	9,00	25,70	69,77	0,111	0,030
9. Iriondo	2,66	11,00	9,40	9,80	10,20	10,07	25,70	69,72	0,104	0,028
10. Caseros	2,94	10,63	9,40	10,25	10,01	10,09	20,77	69,36	0,142	0,033
11. General López	3,16	10,00	8,10	7,40	9,05	8,50	25,40	61,75	0,124	0,036
12. Colón I-1	3,32	10,60	9,80	8,90	10,20	9,77	23,18	48,49	0,143	0,046
13. Pergamino I-1	3,14	11,80	12,50	13,70	12,15	12,67	22,74	64,91	0,138	0,036
14. Pergamino I-2	2,44	10,10	10,30	9,90	10,20	10,10	22,74	64,91	0,107	0,028
15. S. A. de Areco I-1	3,50	10,90	no evaluado	no evaluado	no evaluados	no evaluado	26,60	57,46	0,132	0,042
16. S. A. de Areco I-2	3,95	8,00	8,90	8,60	8,45	8,50	26,60	57,46	0,148	0,047
17. Rojas	3,14	12,80	10,40	10,40	11,60	11,20	23,18	48,49	0,135	0,044

(continúa...)

Tabla 13- (continuación)

Partido/ Departamento	MO (%)	S-SO4 0-20 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO4 20-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO4 40-60 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO4 ²⁻ 0-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO4 0-60 cm (mg kg ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	MO/arcilla	MO/(arcilla + limo)
18. Junín I-1	1,90	10,40	11,30	10,70	10,85	10,80	15,42	26,04	0,123	0,046
19. Junín I-2	2,70	11,90	14,20	12,20	9,80	12,77	18,80	43,60	0,144	0,043
20. 9 de Julio I-1	3,35	9,90	9,70	8,40	9,30	9,33	14,70	29,20	0,228	0,076
21. 9 de Julio I-2	4,05	9,80	8,80	9,80	13,05	9,47	14,20	23,50	0,285	0,107
22. Tandil I-1	5,84	13,20	12,50	13,10	12,85	12,93	29,40	41,80	0,199	0,082
23. Tandil I-2	6,49	13,40	10,10	12,20	11,75	11,90	29,40	41,80	0,221	0,091
24. Rivadavia	1,90	7,80	7,40	11,80	7,60	9,00	8,90 (**)	22,31 (**)	0,213	0,061
25. Trenque Lauquen	2,62	9,10	9,20	8,10	9,15	8,80	13,00 (**)	6,90 (**)	0,202	0,132
26. Maracó (*)	1,10	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	7,00 (**)	17,64 (**)	0,157	0,045
27. Catriló I-1 (*)	1,95	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	15,44 (**)	41,64 (**)	0,126	0,034
28. Catriló I-2	1,51	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	8,90 (**)	3,56 (**)	0,170	0,121
29. Capital I-1	2,82	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	no evaluado	16,44 (**)	40,64 (**)	0,172	0,049

(*) Ensayos no considerados en la evaluación de herramientas de diagnóstico. (**) Determinado en laboratorio.

En la Figura 9 se presentan las relaciones encontradas entre la respuesta a la fertilización azufrada y las diferentes variables de suelo evaluadas.

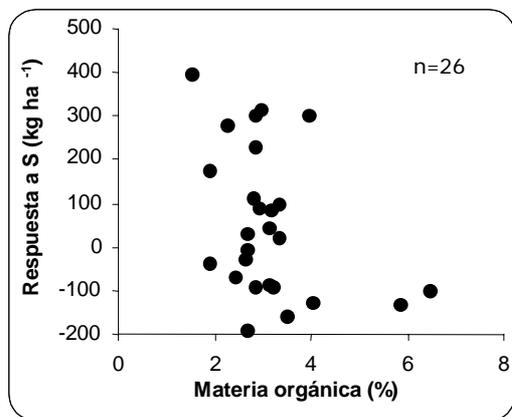


Figura 9.a

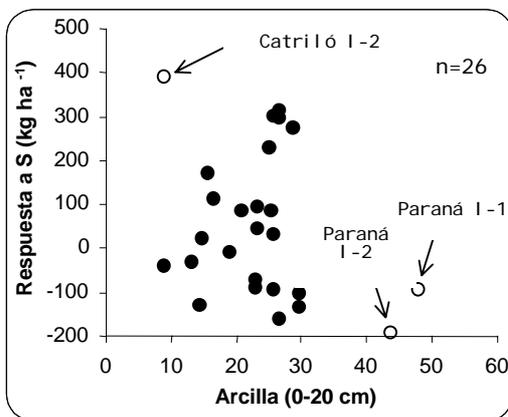


Figura 9.b

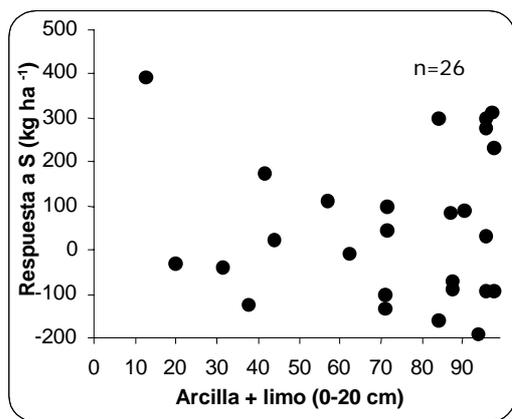


Figura 9.c

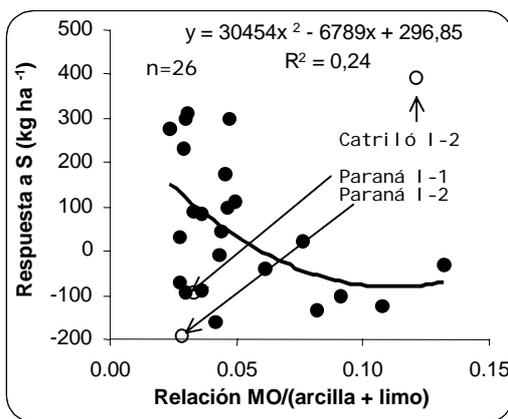


Figura 9.d

(continúa...)

Figura 9- (continuación)

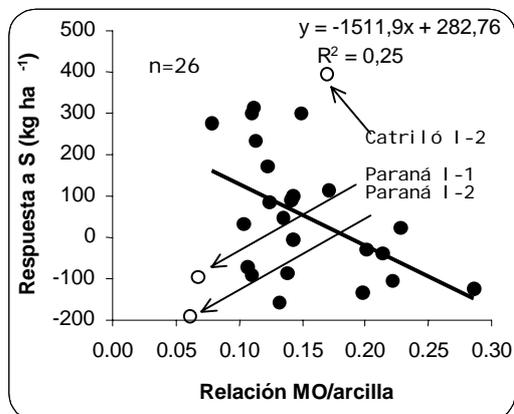


Figura 9.e

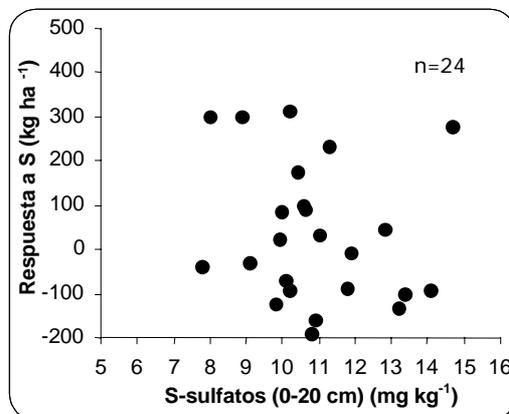


Figura 9.f

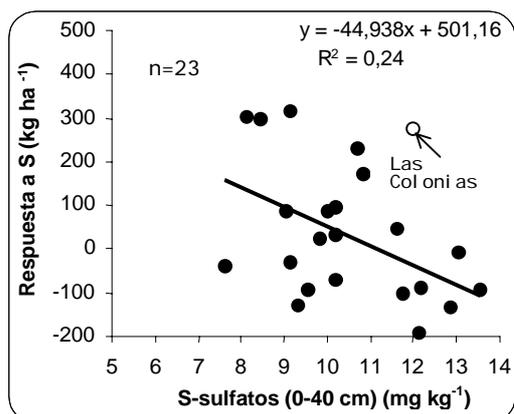


Figura 9.g

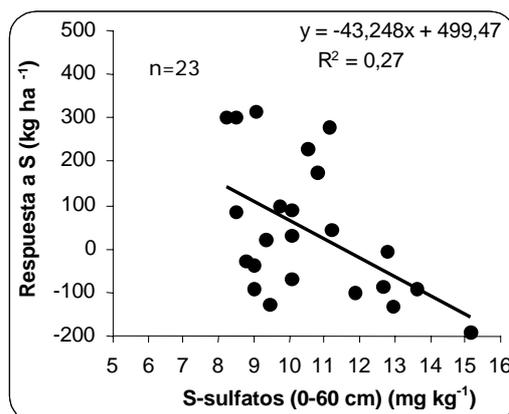


Figura 9.h

Figura 9- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de parámetros de suelo evaluados a la siembra. Ensayos campaña 2000/01.

Los círculos vacíos indican sitios no considerados en el análisis.

Ninguna variable de suelo por sí sola logró explicar en forma satisfactoria la respuesta a S. En un área muy amplia y con diversidad textural como la abarcada por esta red de ensayos, el tenor de MO no refleja solamente el nivel de degradación y la capacidad de suministrar nutrientes del suelo, sino también su

composición textural. Esto sucede porque las arcillas y en menor medida el limo ejercen una protección física y química sobre la MO del suelo, retardando su descomposición (Alvarez y Lavado, 1998; Galantini et al., 2002). Como consecuencia de ello, la MO no fue un indicador apropiado para predecir la respuesta a S (Figura 9.a), a pesar de la importancia de las fracciones orgánicas en la dinámica de este nutriente. Por otro lado, la textura (porcentajes de arcilla y de arcilla + limo) tampoco permitió anticipar satisfactoriamente la respuesta a la fertilización azufrada en Soja (Figuras 9.b y 9.c). Aún cuando parece haber una tendencia general a aumentar la respuesta con la disminución del porcentaje de arcilla, esta asociación fue débil y claramente dominada por dos sitios de textura muy fina (Paraná I-1 y Paraná I-2), y un sitio muy arenoso y de alta respuesta (Catriló I-2). Descartando estos tres ensayos (círculos vacíos, Figura 9.b), no se observó ninguna tendencia definida. La explicación a esta falta de relación residiría en que si bien la abundancia de material fino ha sido asociada con un incremento en la MO, y con ello en el S total, no se ha observado sin embargo asociación entre la textura y la MO joven, que es la fracción más activa en la dinámica de los nutrientes (Galantini et al., 2002). En otros países, como EEUU, se recomienda la fertilización con S en suelos arenosos (Johnson, 1987); no obstante, en Argentina se han informado numerosos ejemplos de respuesta sobre suelos que no poseían esta condición textural (Martínez y Cordone, 1998, 2000; Melgar y Gearhart, 2000).

El contenido de MO ajustado por textura podría representar una estimación rápida y aceptable de la MO joven, fácilmente mineralizable, cuya determinación

es más compleja y no realizada como rutina en los laboratorios comerciales. En esta red, la relación MO/(arcilla + limo) no logró predecir adecuadamente la respuesta a S, aunque retirando del análisis los mismos tres sitios que se eliminaron en la Figura 9.a, se observó una débil tendencia cuadrática a disminuir la respuesta con el aumento de esta relación (Figura 9.d). Más apropiada parecería ser la relación MO/arcilla, la que pudo ser ajustada mediante una ecuación lineal (Figura 9.f) y requiere la determinación de una variable menos (contenido de limo), aunque después de descartar los tres ensayos antes mencionados sólo se logró explicar un 25 % de la respuesta a S.

La disponibilidad de S-sulfatos en superficie (0-20 cm), el parámetro más comúnmente evaluado con objetivos de diagnóstico, no permitió explicar la respuesta a S (Figura 9.f). Los sulfatos son móviles en el suelo y, por lo tanto, en períodos lluviosos pueden acumularse en los horizontes subsuperficiales. Bajo dichas condiciones, sería esperable lograr mejores asociaciones cuando la determinación de sulfatos alcanza a estratos más profundos del suelo. Probablemente por este motivo, se obtuvo un ajuste levemente mejor cuando la evaluación se realizó hasta los 40 cm (Figura 9.g), luego de retirar del análisis el sitio Las Colonias, el cual puede considerarse como un “outlier” (valor residual estudentizado mayor a dos) para esta variable. De acuerdo con este razonamiento, la disponibilidad de S-sulfatos en el espesor 0-60 cm fue el parámetro de suelo que mejor explicó la respuesta a la fertilización azufrada en Soja, en forma significativa y sin puntos fuera de tendencia, aunque sin el ajuste necesario como para basar un criterio de recomendación en esta única variable (Figura 9.h). El

estrecho rango en la disponibilidad de S-sulfatos observado en todas las profundidades evaluadas, y la relativa precisión de la determinación de los mismos por turbidimetría en el extracto de suelo, sumado a la dificultad de evaluar un nutriente móvil en el perfil y con una dinámica muy asociada al ciclo de la MO, explicarían, al menos en parte, la debilidad de estas estimaciones.

Utilizando el procedimiento Stepwise (tanto para un valor $\alpha=0,10$ como $\alpha=0,05$) en el ámbito de toda la red, la relación MO/arcilla y la disponibilidad de S-sulfatos (0-60 cm) fueron los parámetros seleccionados. Las variables evaluadas incluyeron a todas aquellas presentadas en la Figura 9, a las que se les sumó también la relación MO/limo. Descartando en sucesivas aproximaciones los sitios fuera de tendencia (valor residual estudentizado mayor a dos), se logró explicar el 70 % de la respuesta a S. Los resultados de las iteraciones se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14- Modelos de regresión seleccionados para explicar la respuesta a S en Soja de primera. Procedimiento Stepwise ($P=0,10$). Ensayos campaña 2000/01.

Modelo	n	Coefficiente de determinación (R^2)	Sig. est. (P)	Sitios con VRE > 2
Resp=819 – 1357 MO/arcilla – 55 S-sulfatos (0-60 cm)	23	0,48	0,0009	Marcos Juárez I-2
Resp=948 – 1578 MO/arcilla – 63 S-sulfatos (0-60 cm)	22	0,62	0,0001	Pergamino I-2
Resp=1017 – 1742 MO/arcilla – 66 S-sulfatos (0-60 cm)	21	0,70	0,0000	-----

n: número de sitios incluidos en el modelo.

Sig. est.: Nivel de significancia estadística del modelo propuesto.

VRE: Valor residual estudentizado del ensayo individual respecto del modelo propuesto. En las sucesivas iteraciones se excluyeron aquellos ensayos cuyos valor residual estudentizado fue mayor a dos.

Además de los tres sitios desestimados desde un principio por su muy baja productividad (Río Cuarto I-1, Maracó y Catriló I-1), en el análisis de la Tabla 14 se excluyeron también los ensayos San Antonio de Areco I-1, Catriló I-2 y Capital I-1, por no disponerse de los valores de S-sulfatos hasta los 60 cm de profundidad.

Los modelos seleccionados tienen sentido biológico, ya que S-sulfatos (0-60 cm) expresa la disponibilidad inicial del nutriente en el suelo, y la relación MO/arcilla representaría una estimación indirecta de la capacidad para mineralizarlo, teniendo en cuenta que más del 95 % del S del suelo se encuentra en forma orgánica (Ericksen, 1997 *a*; Galantini et al., 2002) y que la arcilla podría ejercer un efecto protector sobre este S orgánico, impidiendo o retardando su

pasaje a formas disponibles. Ambas variables pueden integrarse en un modelo aditivo dado que no están correlacionadas entre sí ($r=0,33$; $P=0,14$ para el último modelo propuesto en la Tabla 14 [$n=21$]).

3.a.4- ESTUDIOS DIRECTOS DE MINERALIZACIÓN: INCUBACIONES DE SUELO

En la Tabla 15 se presentan los valores de S-sulfatos mineralizados en las incubaciones de suelos (S-inc).

Tabla 15- *S-sulfatos inicial, S-sulfatos final y S-sulfatos mineralizados (S-inc) en incubaciones controladas de muestras superficiales (0-20 cm) de suelo. Doce sitios de todo el país, seleccionados por su bajo error experimental, variabilidad textural y respuesta diferencial a la fertilización azufrada. Campaña 2000/01.*

Partido/ Departamento	S-sulfatos inicial (mg kg⁻¹)	S-sulfatos final (mg kg⁻¹)	S-inc (final-inicial) (mg kg⁻¹)
1. San Jerónimo I-1	6	27	21
2. Las Colonias	13	32	19
3. Belgrano I-1	10	17	7
4. Paraná I-1	5	6	1
7. Marcos Juárez I-1	8	20	12
11. General López	6	23	17
12. Colón I-1	7	20	13
18. Junín I-1	5	14	9
19. Junín I-2	6	22	16
21. 9 de Julio I-2	7	26	19
22. Tandil I-1	8	47	39
23. Tandil I-2	13	45	32

En forma consistente con las estimaciones indirectas de la capacidad de mineralización de S (Relación MO/arcilla), la medición directa del proceso a

través de incubaciones de suelos mostró un buen ajuste con la respuesta a la fertilización. Retirando del análisis uno de los 12 sitios evaluados (Paraná I-1), el cual corresponde a un suelo con elevado contenido de arcillas (Tabla 13) y por este motivo de alta capacidad de fijación, hecho que podría haber provocado un comportamiento diferencial respecto a la mineralización de S (Figura 10.a), se observa una adecuada asociación ($R^2 = 0,56$) entre S-inc y la respuesta al nutriente (Figura 10.b).

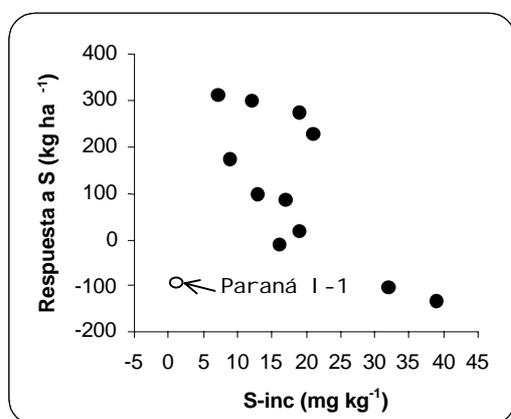


Figura 10.a

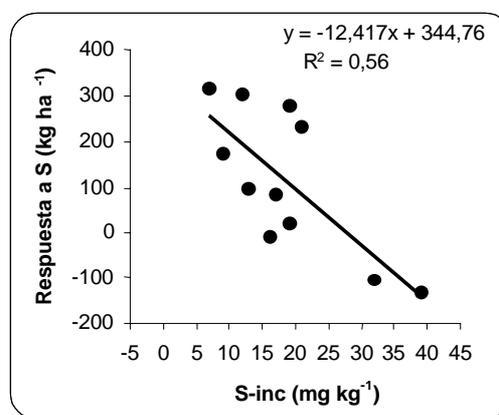


Figura 10.b

Figura 10- *Relación entre la respuesta al agregado de S y la concentración de S-sulfatos mineralizados por incubaciones de muestras superficiales de suelo (S-inc). Campaña 2000/01. Figura 10.a: incluye el sitio Paraná I-1; Figura 10.b: ajuste luego de retirar del análisis al sitio Paraná I-1.*

Sin embargo, debe mencionarse que la tendencia lineal presentada está marcadamente influenciada por dos puntos, correspondientes a los sitios Tandil I-1 y Tandil I-2, que ejercen un fuerte efecto de “palanca” (leverage) sobre la pendiente de la recta de regresión. Aún con esta salvedad, cabe destacar que las incubaciones de suelo lograron expandir notablemente el rango de la variable

regresora (7-39 mg kg⁻¹ de S-inc, excluyendo el ensayo Paraná I-1) en comparación con la determinación inicial de S-sulfatos (rango: 7,8-14,7 mg kg⁻¹ S-sulfatos [0-20 cm] a la siembra). Para que una variable regresora pueda ser utilizada como base de un método de diagnóstico, es necesario que abarque un rango suficientemente amplio. En caso contrario, sería dificultoso establecer umbrales críticos para identificar sitios con y sin probabilidades de respuesta, los que tendrían valores muy similares entre sí. Diversos autores han reportado valores de mineralización de S-sulfatos inferiores a los presentados en la Tabla 15. Así, Tabatabai y Bremner (1972), trabajando con muestras de suelo de Iowa (EEUU) encontraron inmovilización de S-sulfatos en incubaciones de dos semanas, y, luego de un período de 6 semanas, un máximo de 6 mg kg⁻¹ de S-sulfatos mineralizados. Por su parte, Maynard et al. (1983) observaron un balance de mineralización-inmovilización prácticamente neutro luego de 17 semanas, y Tabatabai y Al-Khafaji (1980) determinaron una mineralización de S-sulfatos que no superaba el 30 % de la disponibilidad inicial, luego de un período de dos semanas de incubación. La diferencia existente entre los valores determinados en esta experiencia y los informados en la bibliografía, originan la necesidad de seguir estudiando la utilidad de esta herramienta, tanto en su valor predictivo de la respuesta a S como en la capacidad para crear un amplio rango de valores que posibilite diferenciar la capacidad de mineralización de diferentes suelos.

La variable S-inc mostró correlaciones significativas con otras variables como MO ($r=0,84$; $P=0,001$) y MO/arcilla ($r=0,62$; $P=0,04$) (ver Tabla 17 en el punto 3.a.5 de este capítulo), lo cual demostraría la validez de considerar a todas

ellas como estimadores de un mismo proceso, la capacidad del suelo para mineralizar S. Desde el punto de vista operativo, las incubaciones de suelo constituyen una práctica relativamente poco costosa y fácil de reproducir en laboratorio, y por lo tanto potencialmente aptas para ser desarrolladas como un método de diagnóstico. Adicionalmente, la obtención de la muestra no presenta más exigencias que las de un análisis convencional de suelos. De todos modos, sería necesario evaluar tiempos más cortos de incubación (por ejemplo 7 días en lugar de 15), así como otros detalles metodológicos (contenido de humedad de la muestra, peso de suelo incubado) con el objetivo de aumentar su valor predictivo y practicidad. Índices de esta naturaleza han sido propuestos en otras partes del mundo (Nueva Zelanda) para basar la recomendación de fertilización de pasturas con S (Ghani, 1994).

3.a.5- VALORACIÓN DE LAS INCUBACIONES EN RELACION A OTRAS VARIABLES DE SUELO

Casi todas las variables de suelo mejoraron su valor predictivo (la excepción fue la relación MO/[arcilla+limo]) cuando se consideró sólo el grupo de ensayos elegido para las incubaciones (excluyendo a Paraná I-1) en lugar de la totalidad de los experimentos de la red (ver Figura 9 y Tabla 14). Los valores de R^2 y la significancia estadística de los respectivos modelos de regresión lineal para este grupo reducido de ensayos se presentan en la Tabla 16. Al igual que en el análisis de toda la red, la ecuación compuesta por las variables MO/arcilla y S-sulfatos (0-60 cm) presentó mejor ajuste que cualquier otro modelo, logrando explicar el 84 % de la respuesta a la fertilización azufrada en Soja.

Comparativamente, S-inc presentó un menor valor predictivo, aún cuando esta variable se integró en un modelo con S-sulfatos (0-60 cm) tratando de reflejar el S potencialmente mineralizable y la disponibilidad inicial del nutriente.

Tabla 16- *Coefficiente de determinación y significancia estadística de modelos de regresión lineal de la respuesta a la fertilización azufrada en Soja, en base a distintas variables de suelo, para 11 sitios de bajo error experimental. Campaña 2000/01.*

Modelo propuesto	Coefficiente de determinación y significancia estadística
Resp=345 – 12 S-inc	R ² =0,56 P=0,0081
Resp=401 – 84 MO	R ² =0,57 P=0,0074
Resp=355 – 3222 MO/limo	R ² =0,75 P=0,0005
Resp=510 – 2720 MO/arcilla	R ² =0,70 P=0,0012
Resp=89 + 317 MO/(limo + arcilla)	R ² =0,04 P=0,5622
Resp=543 – 10 S-inc – 23 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,60 P=0,0269
Resp=708 – 67 MO – 35 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,67 P=0,0112
Resp=574 – 2765 MO/limo – 24 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,80 P=0,0016
Resp=846 – 2317 MO/arcilla - 38 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,84 P=0,0006
Resp=756 – 46 MO/(limo + arcilla) + 61 S-sulfatos (0-60 cm)	R ² =0,38 P=0,1459

En la Tabla 17 se describen las correlaciones entre las variables de suelo que mejor anticiparon la respuesta a S.

Tabla 17- *Análisis de multicolinealidad entre diferentes variables de suelo para 11 sitios de bajo error experimental cuyas muestras de suelos fueron incubadas. Campaña 2000/01.*

	Arcilla (%)	MO (%)	Relación MO/limo	Relación MO/Arcilla	S-inc (mg kg⁻¹)	S-sulfatos (0-20 cm) (mg kg⁻¹)	S-sulfatos (0-40 cm) (mg kg⁻¹)
MO (%)	r=0,51 P=0,11						
MO/limo	r=0,12 P=0,73	r=0,06 P=0,87					
MO/arcilla	r=0,15 P=0,66	r=0,75 P=0,008 (***)	r=0,01 P=0,98				
S-inc (mg kg⁻¹)	r=0,48 P=0,14	r=0,84 P=0,001 (***)	r=0,06 P=0,85	r=0,62 P=0,04 (**)			
S-sulfatos (0-20 cm) (mg kg⁻¹)	r=0,50 P=0,12	r=0,41 P=0,21	r=0,40 P=0,22	r=0,10 P=0,78	r=0,64 P=0,03 (**)		
S-sulfatos (0-40 cm) (mg kg⁻¹)	r=0,09 P=0,78	r=0,34 P=0,31	r=0,46 P=0,15	r=0,26 P=0,45	r=0,59 P=0,05 (*)	r=0,82 P=0,002 (***)	
S-sulfatos (0-60 cm) (mg kg⁻¹)	r=0,12 P=0,72	r=0,43 P=0,19	r=0,36 P=0,28	r=0,32 P=0,34	r=0,63 P=0,04 (**)	r=0,78 P=0,005 (***)	r=0,98 P=0,0000 (***)

(*) *Correlación entre variables significativa ($\alpha= 0,1$).*

(**) *Correlación entre variables significativa ($\alpha= 0,05$).*

(***) *Correlación entre variables significativa ($\alpha= 0,01$).*

Como se desprende de la Tabla 17, S-inc está significativamente correlacionado con MO y con MO/arcilla. Estas dos últimas variables son más fáciles y económicas de medir, ya que la determinación de S-inc implica dos análisis químicos y el costo energético necesario para mantener controlada la temperatura durante el período de incubación. S-inc también está correlacionado con la concentración de S-sulfatos, no sólo en el horizonte superficial (0-20 cm) sino también a mayores profundidades (0-40 y 0-60 cm; Tabla 17); por lo tanto, no podrían integrarse en un modelo aditivo ya que estarían explicando similares fuentes de variación. En cambio, MO y MO/arcilla no están correlacionadas con S-Sulfatos cualquiera sea la profundidad considerada, y sería factible integrarlas en un modelo único. Las variables MO/arcilla y S-sulfatos (0-60 cm) no estuvieron así correlacionadas tanto analizando la red entera (21 sitios; ver punto **3.a.3** de este capítulo) como cuando se consideran los 11 sitios en que se evaluó S-inc. Integradas en una misma ecuación mostraron mejor ajuste con la respuesta a S que cualquier otro modelo, y desde el punto de vista operativo ambas variables son sencillas de valorar y a un bajo costo, pudiendo disponerse de los resultados en un período de tiempo muy breve desde la toma de la muestra de suelo. Estos aspectos convierten a este modelo en el más apropiado para anticipar la respuesta a la fertilización azufrada en base a las variables de suelo analizadas durante la campaña 2000/01.

Es necesario destacar que los parámetros de este modelo difieren en buena medida de los del modelo análogo que surge del análisis de los datos de toda la red (Tabla 14). Esta inestabilidad del modelo, si bien no afecta la valoración

realizada sobre la utilidad de las variables que lo integran, impide el establecimiento de umbrales críticos con una precisión razonable. Las causas de la inestabilidad en los parámetros del modelo deben buscarse en el muy limitado número de sitios que presentaron respuesta a S, lo que hace que pocos ensayos con ese comportamiento gobiernen la tendencia del conjunto de los datos. Esta dificultad podría superarse si se dispusiera de un número equilibrado de sitios en las zonas de respuesta y de no respuesta a la fertilización.

3.b- ENSAYOS CAMPAÑA 2001/02

3.b.1- RESULTADOS GENERALES DE LA RED: RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN AZUFRADA EN SOJA DURANTE EL SEGUNDO AÑO DE ENSAYOS

En la Tabla 18 se presentan los rendimientos de los ensayos conducidos durante la campaña 2001/02, así como los análisis estadísticos de estos resultados y las respuestas medias al agregado de S.

Tabla 18- Rendimiento de grano, significancia estadística, coeficiente de variación (C.V.) y respuesta media a la fertilización con S. Ensayos campaña 2001/02. Los rendimientos son promedio de cuatro repeticiones (tres en Río Segundo y Constitución, dos en Junín II-2). Respuesta a S = $[(T2-T0) + (T3-T1)]/2$. Para un mismo sitio, los rendimientos seguidos de diferentes letras difirieron significativamente (LSD, $\alpha=0,10$).

Partido/ Departamento	Rendimiento (kg ha ⁻¹)					Anova P > F	C.V. (%)	Respuesta a S (kg/ha ⁻¹)
	T0	T1	T2	T3	T4			
30. Tercero Arriba	3579	3939	3651	3844	3611	0,2043	6,41	-11
31. Río Segundo	2816	2985	2634	2873	2648	0,1955	6,67	-147
32. San Jerónimo II-1	3843 d	4288 bc	4141 c	4478 ab	4586 a	0,0020	4,78	244
33. Belgrano II-1	4330	4287	4384	4441	4498	0,4374	3,81	104
34. Paraná II-1	3062	3140	2888	2888	2884	0,2468	6,50	-213
35. Uruguay	2661 b	3008 a	2069 c	2463 b	2681 b	0,0008	8,42	-568
36. Marcos Juárez II-1	3669	3901	3587	3730	3688	0,5083	7,42	-127
37. Río Cuarto II-1	2840	2667	2924	2727	3147	0,1303	8,86	72
38. Constitución	4279	4391	4320	4630	4067	0,2084	5,93	140
39. Colón II-1	4479 b	4656 b	4745 b	5199 a	4691 b	0,0084	4,73	404
40. S.A. de Areco II-1	4278	4294	4304	4468	4429	0,7741	5,99	101
41. Junín II-1	3265 c	4154 a	3687 b	4352 a	4284 a	0,0005	7,04	310
42. Junín II-2	3482 a	3502 a	2755 b	3442 a	3486 a	0,0225	4,31	-394
43. 9 de Julio II-1	2746 d	3427 bc	3124 cd	3786 ab	3981 a	0,0117	12,81	369
44. General Pinto	4202	4304	3978	4579	4694	0,1435	9,15	25
45. Tandil II-2	2719	2443	2885	2493	2762	0,9071	28,38	108
46. Capital II-1	2241 b	2484 ab	2170 b	2744 a	2196 b	0,0723	12,29	95

En el segundo año de ensayos fue muy poco frecuente observar respuesta a la fertilización con S, registrándose diferencias significativas ($P < 0,10$) entre los tratamientos T2 y T0 en dos casos, y entre los tratamientos T3 y T1 en una sola oportunidad. Con respecto a la magnitud de las respuestas a S, y considerando los incrementos medios (con y sin P), se determinaron aumentos de rendimiento mayores a 200 kg ha^{-1} en cuatro ensayos, y en tres de ellos la respuesta fue superior a 300 kg ha^{-1} . Dos de los sitios con respuesta significativa se localizaron en el norte de Buenos Aires, y el restante en el centro de Santa Fe. A través de dos años, la región que comprende el centro-sur de Santa Fe y el centro-norte de Buenos Aires, junto a la provincia de La Pampa, fueron las únicas áreas en las que se observaron incrementos significativos de rendimiento, aunque en esta última provincia solamente un ensayo durante el primer año manifestó este comportamiento. Esto indicaría que en amplios sectores de la zona sojera argentina los suelos estarían en condiciones de satisfacer las necesidades de S de un cultivo de Soja de primera, y que el potencial de respuesta en estas áreas es hoy aún limitado. En coincidencia con estos resultados, en la Figura 11, en la cual se grafica la respuesta a S y su desviación estándar para los 17 ensayos de la campaña 2001/02, se observa la falta de una tendencia definida a aumentar los rendimientos con la aplicación de este nutriente.

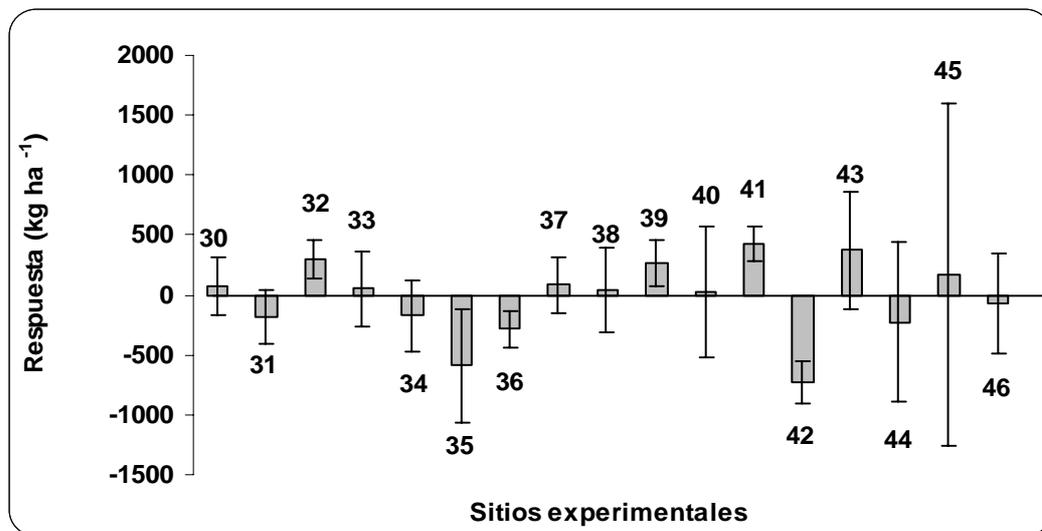


Figura 11.a

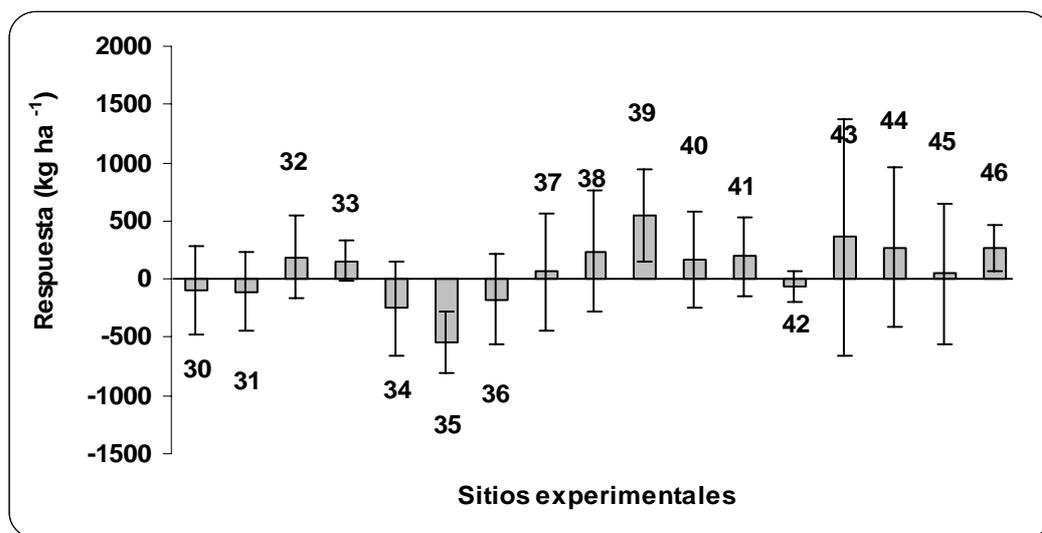


Figura 11.b

Figura 11- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera sin agregado de P (a) o con agregado de P (b). Ensayos campaña 2001/02. Los números corresponden a los sitios presentados en la Tabla 2. Las barras grafican la respuesta media a S y las líneas verticales representan la desviación estándar respecto de la media.

Considerando los tratamientos sin fertilización fosforada de base (Figura 11.a) sólo los ensayos San Jerónimo II-1, Colón II-1 y Junín II-1 presentaron respuestas a S positivas superiores a la desviación estándar respecto de la media. Esta misma situación se repitió en dos ensayos (Colón II-1 y Capital II-1) al analizar los tratamientos con agregado de P (Figura 11.b).

3.b.2- PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA A S EN BASE A VARIABLES DE MANEJO

Los ensayos Junín II-2 (dos repeticiones perdidas) y Tandil II-1, afectado por un error experimental demasiado elevado en los rendimientos (C.V.=28,4 %; Tabla 18) fueron excluidos del análisis de los resultados. Tampoco fue tenido en cuenta al ensayo Uruguay, cuya importante respuesta negativa ($P < 0,10$) a la fertilización con S no tiene explicación aparente. Como sucediera en el primer año de ensayos, no se determinaron diferencias de respuesta a la fertilización azufrada entre diferentes antecesores ($P=0,21$), sistemas de labranza ($P=0,26$) (Tabla 4) o variedades utilizadas ($P=0,11$) (Tabla 6). Con respecto a las dos últimas variables, la mayoría de los sitios fueron implantados en siembra directa y con el predominio de un cultivar (DM 4800 RR); por lo tanto, no se dispuso de variabilidad suficiente como para estudiar ambas variables con detenimiento. En cambio, se observó un incremento en la respuesta a la fertilización azufrada a medida que aumentaban los años de agricultura continua, siguiendo una función cuadrática (Figura 12). Sin embargo, el ajuste de esta ecuación no es demasiado elevado, y la variable independiente presenta los inconvenientes ya descriptos en el punto **3.a.2** de este capítulo.

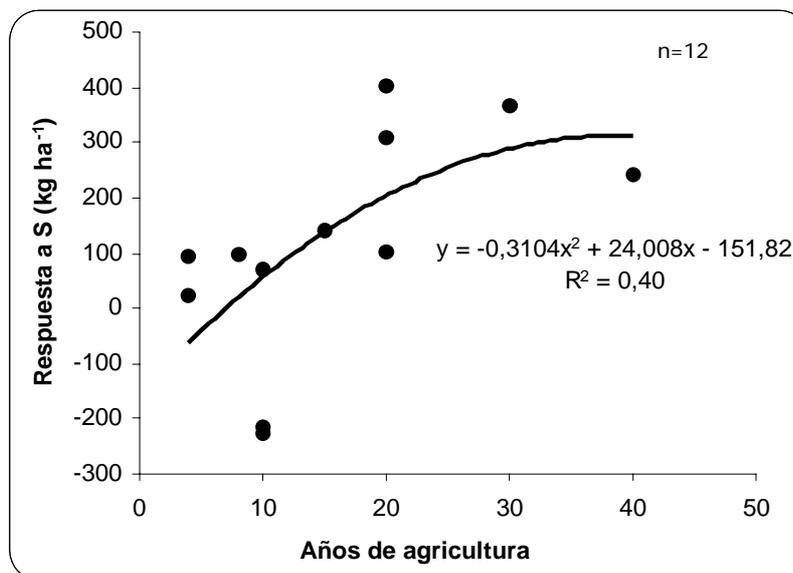


Figura 12- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de los años de agricultura continua desde la última pradera. Ensayos campaña 2001/02. Los datos de la historia agrícola de los sitios fueron suministrados por los propios productores. Se presenta la información proveniente de 12 sitios: se eliminaron del análisis los ensayos Junín II-2, Tandil II-1 y Uruguay (ver punto 3.b.2), y a estos se le suman los dos sitios sin información de años de agricultura (Tabla 4).

3.b.3- PREDICCIÓN DE LA RESPUESTA A S EN BASE A PARÁMETROS DE SUELO EVALUADOS A LA SIEMBRA

En la Tabla 19 se presentan los datos de las variables de suelo que fueron evaluadas con objetivo de diagnóstico.

Tabla 19- Variables de suelo evaluadas a la siembra con objetivo de diagnóstico de la fertilidad azufrada en Soja de primera. Ensayos campaña 2001/02. Los valores presentados son promedio de las repeticiones de cada ensayo.

Partido/ Departamento	MO (%)	S-SO ₄ ²⁻ 0-20 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 20-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 40-60 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 0-40 cm (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ 0-60 cm (mg kg ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	MO/ arcilla	MO/(arcilla + limo)
30. Tercero Arriba	1,69	9,60	8,90	9,20	9,25	9,23	14,10 (**)	34,60 (**)	0,120	0,035
31. Río Segundo	1,03	8,70	10,50	12,60	9,60	10,60	11,60 (**)	19,10 (**)	0,089	0,034
32. San Jerónimo II-1	2,68	9,63	8,13	7,45	8,88	8,40	25,00	72,50	0,107	0,027
33. Belgrano II-1	3,08	8,60	8,00	8,80	8,30	8,47	20,50	70,80	0,150	0,034
34. Paraná II-1	3,56	10,00	9,80	8,75	9,90	9,52	35,63	62,61	0,100	0,036
35. Uruguay (*)	3,36	11,40	12,80	13,70	12,10	12,63	38,74	53,10	0,087	0,037
36. Marcos Juárez II-1	2,61	10,15	8,48	7,75	9,32	8,79	25,70	69,77	0,102	0,027
37. Río Cuarto II-1	2,06	9,03	8,93	8,50	8,98	8,82	13,80 (**)	34,90 (**)	0,149	0,042
38. Constitución	2,75	9,70	8,97	7,80	9,34	8,82	22,74	64,91	0,121	0,031
39. Colón II-1	3,13	10,25	8,75	8,23	9,50	9,08	23,18	48,49	0,135	0,044
40. S.A. de Areco II-1	2,85	10,63	9,93	no evaluado	10,28	no evaluado	26,60	57,46	0,107	0,034
41. Junín II-1	2,74	11,40	11,40	11,58	11,40	11,46	15,42	26,04	0,178	0,066
42. Junín II-2 (*)	2,54	10,35	9,55	10,60	9,95	10,17	15,42	26,04	0,165	0,061
43. 9 de Julio II-1	3,54	8,90	8,80	8,20	8,85	8,63	14,70	29,20	0,241	0,081
44. General Pinto	2,60	7,60	5,80	4,80	6,70	6,07	12,10	19,00	0,215	0,084
45. Tandil II-1 (*)	4,36	9,07	14,87	26,57	11,97	16,84	29,40	41,80	0,148	0,061
46. Capital II-1	1,46	9,78	8,70	8,43	9,24	8,97	8,24 (**)	31,64 (**)	0,177	0,037

(*) Ensayos no considerados en la evaluación de herramientas de diagnóstico. (**) Determinado en laboratorio.

En la Figura 13 se grafica la respuesta a la fertilización azufrada en función de algunas de las variables presentadas en la Tabla 19, o de índices calculados a partir de ellas.

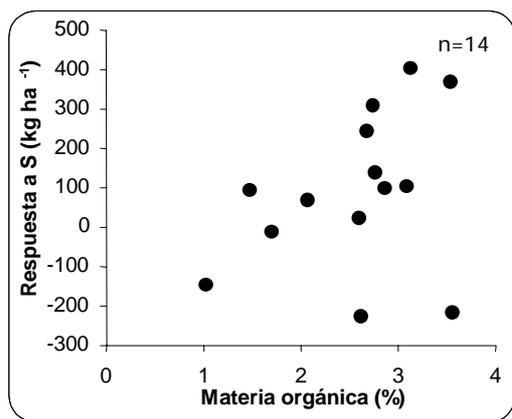


Figura 13.a

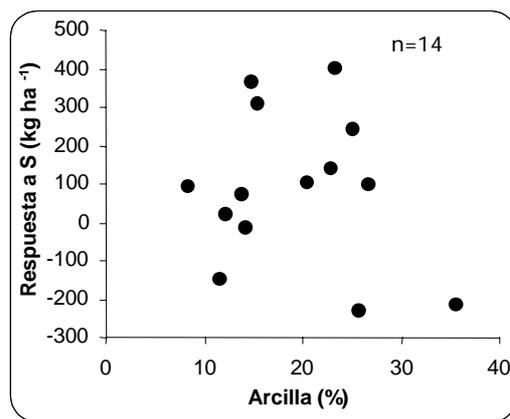


Figura 13.b

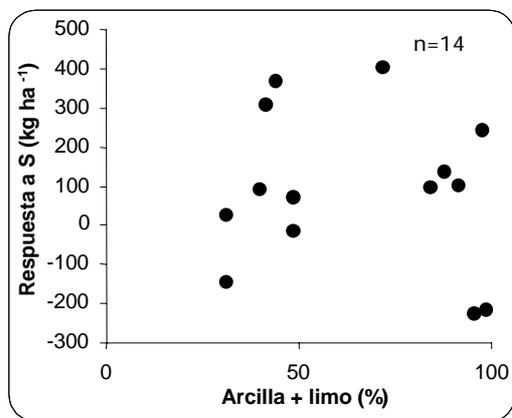


Figura 13.c

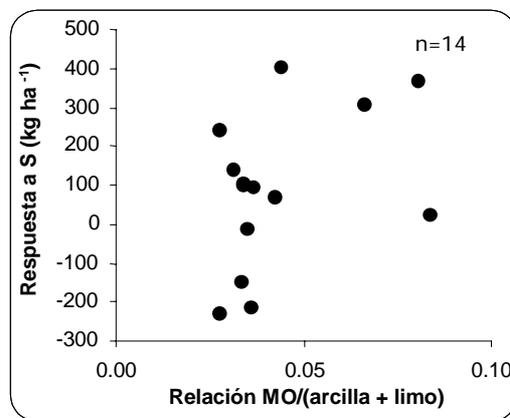


Figura 13.d

(continúa...)

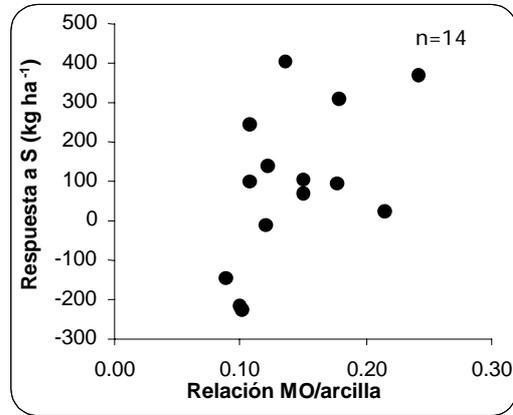
Figura 13- (continuación)

Figura 13.e

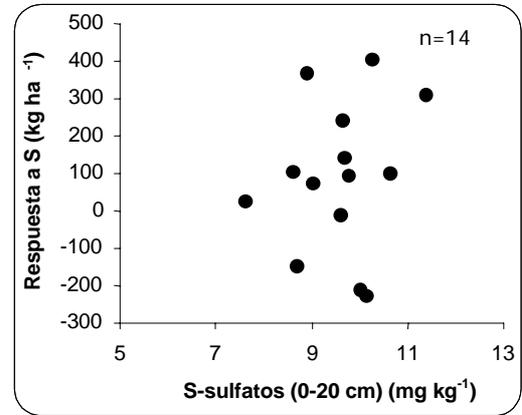


Figura 13.f

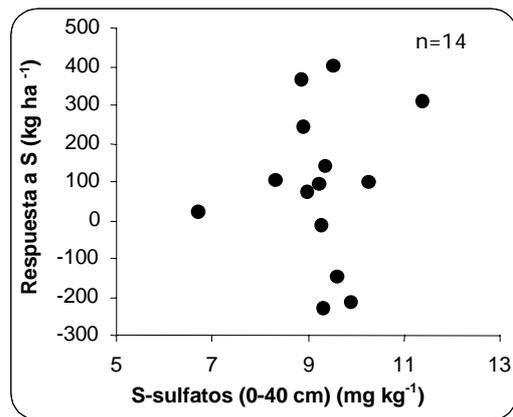


Figura 13.g

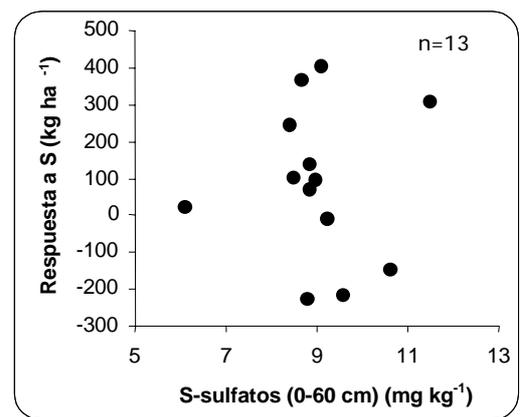


Figura 13.h

Figura 13- Respuesta a la fertilización azufrada en Soja de primera en función de parámetros de suelo evaluados a la siembra. Ensayos campaña 2001/02.

Ninguna variable de suelo logró explicar satisfactoriamente la respuesta al agregado de S durante la campaña 2001/02. Más aún, algunas de ellas, como MO, Relación MO/arcilla y Relación MO/(arcilla + limo), parecieron mostrar una relación inversa (la respuesta tendió a aumentar al incrementarse el valor de estas variables), si bien estas asociaciones son débiles y sin ningún sentido biológico.

Del mismo modo, el procedimiento Stepwise ($\alpha=0,10$) seleccionó la variable MO/arcilla, pero con una tendencia positiva (a mayor valor del índice, mayor respuesta) y muy bajo ajuste ($R^2=0,28$).

Al menos en parte, la explicación de estos resultados podría estar asociada a la limitada confiabilidad de los rendimientos determinados en el segundo año de ensayos. En primer lugar, cabe destacar que además de los tres sitios descartados a priori (Junín II-2, Tandil II-1 y Uruguay), varios ensayos presentaron algunas deficiencias metodológicas, tales como inapropiada aleatorización (S. A. de Areco II-1 y 9 de Julio II-1), menor número de repeticiones (Río Segundo y Constitución), o una inferior representatividad de las muestras de suelo (una muestra compuesta en todo el sitio experimental, en lugar de tomar muestras por bloque) (Río Segundo y Belgrano II-1). Como factor adicional, puede agregarse que varios de los ensayos recibieron precipitaciones por encima de las normales, especialmente durante el mes de marzo (Tabla 20), lo que en muchos casos ocasionó el anegamiento de algunas de las parcelas.

Tabla 20- Precipitaciones registradas en los sitios experimentales durante el período siembra-cosecha. Ensayos campaña 2001/02.

Partido/ Departamento	Precipitaciones en el ciclo (mm)	Precipitaciones históricas Nov.-Mar.(mm)	Precipitaciones en Marzo (mm)	Precipitaciones históricas Marzo(mm)
30. Tercero Arriba	(sin información)	580	(sin información)	91
31. Río Segundo	(sin información)	580	(sin información)	91
32. San Jerónimo II-1	626	633	230	143
33. Belgrano II-1	526	564	267	105
34. Paraná II-1	(sin información)	605	134	142
35. Uruguay	1040	588	298	136
36. Marcos Juárez II-1	785	564	183	105
37. Río Cuarto II-1	292	602	40	127
38. Constitución	492	569	230	125
39. Colón II-1	652	540	233	124
40. S.A. de Areco II-1	611	540	186	124
41. Junín II-1	480	572	144	138
42. Junín II-2	622 (*)	572	230 (*)	138
43. 9 de Julio II-1	758	592	565	131
44. General Pinto	(sin información)	(sin información)	(sin información)	(sin información)
45. Tandil II-1	580	479	147	111
46. Capital II-1	455	449	85	92

(*) Precipitaciones hasta el 22 de Marzo, fecha de cosecha del ensayo.

Los valores históricos corresponden a la localidad más próxima al ensayo, o en su defecto a una localidad cercana. Las localidades y el período de referencia son los siguientes: Río Tercero: 1961/1985, Rafaela: 1961/2000, Paraná: 1961/2000, Concepción del Uruguay: 1968/2000, Río Cuarto: 1961/2000, Marcos Juárez: 1968/2000, Wheelwright: 1977/2001, Pergamino: 1910/1999, Junin: 1961/2000, 9 de Julio: 1961/2000, Tandil: 1968/2000, Santa Rosa: 1961/2000. Información suministrada por el Instituto de Clima y Agua (Agrometeorología) CIRN - INTA Castelar, Sección Agrometeorología, EEA-INTA Pergamino; y los propios productores de los establecimientos.

Teniendo en cuenta las dificultades enumeradas, los resultados del segundo año no conforman un juego de datos suficientemente confiable como para poder confirmar la jerarquización de herramientas de diagnóstico propuesta en la primera campaña, ni tampoco brindan elementos suficientes para refutarlas o disminuir su validez. Considerando, además, que durante este segundo año no se logró identificar ninguna variable o modelo que pudiera explicar la respuesta de la Soja a la fertilización azufrada, aquellas identificadas como más promisorias durante el primer año pueden considerarse como la más firme elaboración hacia la definición de un método de diagnóstico con este propósito.

La falta de certidumbre en los rendimientos de la campaña 2001/02 hizo que no se profundizara en la evaluación de otras herramientas de diagnóstico tales como los análisis foliares o las incubaciones de suelo.

4-CONCLUSIONES

- Durante la campaña 2000/01 la respuesta a la fertilización azufrada en Soja tuvo una frecuencia limitada y fue de escasa magnitud. Los sitios con respuesta positiva se concentraron principalmente en el centro-sur de Santa Fe y centro-norte de Buenos Aires.
- Ninguna variable de suelo fue capaz de explicar satisfactoriamente la respuesta a S. Algunos índices que representan la capacidad del suelo para mineralizar sulfatos, como MO, MO/arcilla y S-inc mostraron una leve tendencia, pero sin el grado de ajuste necesario como para basar únicamente en ellos un diagnóstico de fertilización azufrada. Estos tres indicadores están correlacionados entre sí, lo que demuestra que explican procesos o fuentes de variación similares. La variable S-

sulfatos (0-60 cm) mostró un valor predictivo semejante, siendo superior a la valoración de S-sulfatos a menores profundidades.

➤ Una ecuación que integró MO/arcilla y S-sulfatos 0-60 cm fue el modelo seleccionado a través de un proceso de regresión lineal múltiple, explicando con un buen grado de ajuste la respuesta a la fertilización tanto en toda la red ($R^2=0,70$) como en un grupo de ensayos de bajo error experimental ($R^2=0,84$).

Las variables que lo integran no están correlacionadas considerando los datos de toda la red ($r=0,33$; $P=0,14$) o los de los sitios seleccionados para las incubaciones ($r=0,32$; $P=0,34$). En términos agronómicos, estas variables estarían expresando la disponibilidad inicial del nutriente en el perfil (S-sulfatos a 0-60 cm) y una estimación indirecta de la capacidad del suelo para mineralizar S durante el ciclo del cultivo (relación MO/arcilla).

➤ El modelo propuesto tiene como virtudes estar basado en variables simples, fáciles de medir y a un bajo costo, con rápida disponibilidad de los resultados y sin restricciones metodológicas más severas que las de un análisis convencional de suelos.

➤ Las incubaciones de suelo, si bien no presentaron mejor valor predictivo que otros indicadores para explicar procesos similares, arrojaron resultados lo suficientemente promisorios como para justificar que se continúe evaluando su utilidad como herramienta de diagnóstico.

➤ En la campaña 2001/02 solamente tres sitios manifestaron respuesta positiva a la fertilización azufrada. La evaluación de variables de suelo no aportó información de igual grado de confiabilidad a la generada en la campaña

precedente. Una serie de inconvenientes metodológicos en algunos de los ensayos y las características climáticas que afectaron a los cultivos, en buena parte de los casos afectados con lluvias de infrecuente magnitud e intensidad, hacen recomendable no modificar las conclusiones surgidas de la primera campaña, y considerar a los resultados obtenidos en ese primer año de ensayos como la mejor aproximación al objetivo de elaborar un método de diagnóstico de fertilidad azufrada para el cultivo de Soja.

➤ Los resultados presentados en este Capítulo responden a los objetivos planteados de evaluar la potencialidad de respuesta de la Soja a la fertilización azufrada en una amplia región, y permitir jerarquizar indicadores de suelo con fines de diagnóstico. Sin embargo, los coeficientes que acompañan a las variables propuestas (Relación MO/arcilla y S-sulfatos [0-60 cm]) mostraron cierta inestabilidad cuando se comparó la ecuación derivada de toda la red con la resultante del grupo seleccionado de 11 ensayos, lo cual impide definir con certeza umbrales críticos, así como predecir la magnitud de los incrementos de rendimiento a obtener con el cambio en el valor de las variables.

➤ El modelo de dos variables propuesto en este capítulo permite comprobar las hipótesis planteadas en el punto 4 del **Capítulo I** de esta tesis.