

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y AZUFRA
DA EN CEBADA CERVECERA

por

Pablo MESA SECO
María Magdalena RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2020

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Ing. Agr. Nicolás Fassana

Ing. Agr. Sergio Pieroni

Fecha: 23 de diciembre de 2019

Autores:

Pablo Mesa Seco

María Magdalena Rodríguez Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este ciclo que cierra una etapa de nuestras vidas queremos agradecer a las personas que colaboraron en éste. En primer lugar a nuestras familias y amigos por el apoyo y su paciencia.

También a “Tato” nuestro director de tesis, y a los que colaboraron con el trabajo realizado en campo Andrés Baeten, Darío Fros, Maite Fajardo y en el laboratorio a Juan González; sin ellos no podríamos haber logrado el objetivo final.

A Facultad de Agronomía por brindarnos la oportunidad de estudiar y poder culminar esta carrera.

Muchas gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 INTRODUCCIÓN	2
2.2 EL AZUFRE EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA.....	3
2.2.1 <u>Procesos de inmovilización-mineralización</u>	5
2.2.2 <u>Procesos de lixiviación o lavado</u>	7
2.3 DIAGNÓSTICO DE LA DEFICIENCIA.....	8
2.4 RESPUESTA VEGETAL	11
2.4.1 <u>Respuesta al agregado de nitrógeno en función de la</u> <u>disponibilidad de azufre</u>	12
2.4.2 <u>Manejo de la fertilización nitrogenada para cereales de</u> <u>invierno en Uruguay</u>	14
2.5 HIPÓTESIS.....	15
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	16
3.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	16
3.2 TRATAMIENTOS	17
3.3 DETERMINACIONES	19
3.3.1 <u>Determinaciones a campo</u>	19
3.3.2 <u>Determinaciones pos-cosecha</u>	19

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	20
3.5 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO	20
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	22
4.1 RENDIMIENTO EN GRANO.....	22
4.1.1 <u>Respuesta al agregado de nitrógeno</u>	27
4.2 RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN AZUFRADE.....	30
4.2.1 <u>Respuesta al agregado de azufre en Z2.2 y su posible relación con indicadores de respuesta</u>	35
5. <u>CONCLUSIONES</u>	42
6. <u>RESUMEN</u>	43
7. <u>SUMMARY</u>	44
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	45

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Información de cada sitio experimental	16
2. Caracterización de cada sitio en cuanto a fecha de siembra, cultivar, número de cultivos pos-pasturas, precipitaciones acumuladas y rendimiento potencial	24
3. Rendimiento de los tratamientos con N y NyS en Z2.2 y contrastes estadísticos.....	32
4. Resumen de los sitios con respuesta al agregado a azufre	34
5. Caracterización de nutrientes en suelo (NyS) y status nutricional de la planta para los diferentes sitios ordenados según EUS.....	36
6. Resumen del análisis estadístico de los distintos indicadores.....	40
 Figura No.	
1. Modelos de ajuste de N (a) en Z 2.2 (b) Z 3.0	18
2. Evolución de la temperatura para la zona Norte y Sur del año 2009 y el promedio histórico para cada zona	21
3. Precipitaciones mensuales y promedio histórico para zona Norte y Sur	21

4. Ubicación geográfica de los sitios y rendimiento potencial, sobre mapa de precipitaciones acumuladas para el trimestre S+O+N 2009	22
5. Precipitaciones acumuladas para el trimestre S+O+N según sitio para la región Norte y Sur	23
6. Máximo de rendimiento para cada sitio según precipitaciones acumuladas para el trimestre S+O+N	25
7. Árbol de clasificación y regresión para las variables asociadas con la variación del rendimiento	26
8. Rendimiento de los sitios para cada tratamiento de la zona Norte...	27
9. Rendimiento de los sitios para cada tratamiento de la zona Sur	28
10. Rendimiento relativo según unidades de N recomendado Z2.2+50% (a) y rendimiento relativo según unidades de N recomendado Z2.2+Z3.0(b).....	29
11. Respuesta al agregado de N total en pos-emergencia en base a recomendación de modelo a Z2.2+50% de la dosis (a), y N total agregado en pos-emergencia en base a recomendación de modelo Z2.2+Z3.0 (b)	30
12. Dosis de S agregado en Z2.2 y N agregado en Z2.2 y Z3.0 para cada sitio.....	31
13. Rendimiento en grano de los sitios con respuesta al S para el tratamiento testigo, el tratamiento con N en Z2.2 y para los 2 tratamientos con N y S en Z2.2	33

14. Eficiencia de uso del azufre (EUS) en función de las unidades de S aplicadas (a), y (b) eficiencia de uso de S en función del mejor rendimiento con S.....	35
15. Relación entre nivel de S en suelo en estadio Z2.2 de 0-20cm (S-SO ₄ ppm) y nivel en planta en Z3.0(%) para el T2	37
16. Contenido de S en planta determinado en Z3.0 para aquellos sitios con respuesta a la fertilización azufrada para las 2 fuentes utilizadas	38
17. Respuesta al rendimiento en función de distintos indicadores en suelo y planta.....	39
18. Relación entre el rendimiento de los tratamientos con S y el PMN (a) y relación entre el rendimiento de los tratamientos con S el contenido de MO (b).....	41

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay se comenzaron a constatar deficiencias de azufre (S) a partir de comienzos de la década del 2000, por lo que se comienza a detectar respuesta a la fertilización azufrada en diferentes cultivos, entre ellos la cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L).

Las causas de las deficiencias actuales y frecuentes están asociadas a una transformación en el esquema agrícola hacia un sistema más intensivo; menor frecuencia o ausencia de pasturas en las rotaciones, mayor productividad y su consecuente aumento de extracción de nutrientes, suelos con larga historia agrícola, la mayor pureza de los fertilizantes con menor contenido de nutrientes secundarios y mayor frecuencia de soja en el sistema (Hoffman et al., 2004). Estas deficiencias pasan a ser más relevantes con motivo del aumento de la población mundial sin la posibilidad de expandir el área de producción de cereales, leguminosas y oleaginosas en la misma medida, por lo que se apunta a aumentar el rendimiento por unidad de superficie (Jamal et al., 2010).

El S es un nutriente que interactúa muy estrechamente con el nitrógeno (N) y existen antecedentes en los cuales las deficiencias de S disminuyen la absorción y N proteico en la planta. Existe abundante evidencia del impacto que tiene el S sobre la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN), en interacción con el N en distintos.

El objetivo principal del presente trabajo es evaluar la respuesta al S y su interacción con la respuesta al N en situaciones de chacra en la zona litoral Oeste del Uruguay para el cultivo de cebada cervecera. Este trabajo también pretende estudiar los indicadores de diagnóstico que posibiliten separar situaciones de suficiencia o insuficiencia probable de S.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN

El S es un nutriente esencial para las plantas, y éstas toman el azufre proveniente de la mineralización de la materia orgánica de los suelos. Es móvil, con dinámica similar al N y se encuentra muy asociado a la materia orgánica (Tisdale et al., 1993). Pero a diferencia del N, no existen aportes mediante mecanismos de fijación biológica.

Actualmente no existen indicadores claros (como sí hay para el fósforo (P) y N) que permitan en forma objetiva separar las situaciones con alta probabilidad de respuesta de aquellas en donde no tendría sentido fertilizar con S. Sin embargo, es consistente la información que permite pensar en la necesidad de comenzar a agregar S, y por tanto elevar la probabilidad de respuesta (Morón y Baethgen 1996b).

El incremento de la probabilidad de la existencia de deficiencias de azufre a nivel de producción podría obedecer a:

- ⊗ Incremento de la demanda por mayor intensificación de la agricultura y aumento de productividad (Morón, 1996a).
- ⊗ Mayor área agrícola en suelos con larga historia agrícola (Hoffman et al., 2013).
- ⊗ Mayor frecuencia de cultivos, con elevada extracción por año siendo mayor la frecuencia de soja (Jamal et al., 2010).
- ⊗ Uso de fertilizantes con mayor nivel de pureza, y por tanto con menor nivel nutrientes secundarios como el S (Hoffman y Ernst, 2007). Menor aporte de los suelos, dada la supresión del laboreo (más del 90% de toda la agricultura de secano se realiza sin laboreo (Hoffman et al., 2009).
- ⊗ Disminución de la cantidad de S atmosférico aportado por la lluvia.

El bajo aporte de azufre vía fertilización durante la década del 90 y primer década el siglo XXI y el mayor número de cultivos con elevados niveles de extracción de nutrientes sobre los mismos suelos, traería como consecuencia mayor frecuencia de chacras viejas y la probable disminución de la capacidad de aporte de nitrógeno y azufre por parte del suelo.

2.2. EL AZUFRE EN EL SISTEMA SUELO - PLANTA

El ciclo del azufre presenta similitudes con el ciclo del nitrógeno (Tisdale et al., 1993), en la medida que se encuentra muy asociado a la dinámica de la materia orgánica, pero con menor aporte al sistema considerando que no existe el mecanismo de fijación biológica como vía de ingreso. Con la adopción de los sistemas de labranza conservacionistas (siembra directa) y la elevada frecuencia de chacras viejas (> 5 años de agricultura), la tasa de mineralización de la materia orgánica se encuentra disminuida (García Lamothe 2002, Ernst y Siri 2010), lo que explicaría las deficiencias generalizadas de este nutriente a partir de inicios de la segunda década del siglo XXI.

La cantidad total de S en el suelo se encuentra fuertemente asociada a las cantidades de carbono (C) y N (Freney y Williams, 1983). La relación C/N/S es semejante en los distintos suelos agrícolas del mundo 130/10/1-3 (Freney y Williams, 1983). La materia orgánica contiene el 90-98% del S presente y la distribución de S orgánico en profundidad se asocia a ésta.

Las fuentes más importantes de azufre que pueden convertirse en disponibles para las plantas son: la materia orgánica, los minerales del suelo y los gases azufrados de la atmósfera. Siendo la fuente original las rocas primarias que contienen sulfuros metálicos como la pirita (S_2Fe), los cuales por meteorización quedan expuestos y sometidos a oxidación dando como resultado final S bajo la forma de sulfatos (SO_4^{2-}). Otra fuente mineral de S es la fracción arcilla de algunos suelos con elevados contenidos de óxidos de hierro y aluminio, y caolinita. Estas arcillas son capaces de adsorber sulfatos desde la solución del suelo y luego liberarlos lentamente por intercambio aniónico, especialmente en suelos de bajo pH (Echeverría, 2006).

Los minerales del suelo no son tan ricos en S como la fracción orgánica, pero ellos incluyen componentes solubles y disponibles de los cuales dependen las plantas y los microorganismos. El S es mantenido en algunas formas minerales en los suelos, siendo las más comunes los minerales que contienen sulfuros y sulfatos (Echeverría, 2005). Los sulfuros que son encontrados en algunos suelos de regiones húmedas con drenaje restringido, deben ser oxidados a sulfatos antes de que el S pueda ser asimilado por las plantas. Cuando estos suelos son drenados, la oxidación ocurre y se libera una gran cantidad de S y se generan condiciones de extrema acidez (Echeverría, 2005).

La dinámica del S en el sistema suelo-planta se ha asociado a la del N, debido a su similitud y complejidad (Scherer 2001, Echeverría 2005), pero este se absorbe de manera más tardía que el N durante el ciclo de un cultivo anual.

El azufre es absorbido como sulfato e ingresa a la planta a través del sistema radicular, también puede ingresar a través de las hojas en forma de gas SO_2 atmosférico, pero esta forma se ha visto disminuida ya que en regiones industriales se observa que la

concentración de SO_2 atmosférico ha ido disminuyendo como resultado de nuevas tecnologías de producción limpias aplicadas en la industria. Esto también supone que disminuyó la entrada natural por deposición atmosférica al suelo (Mc Grath y Zhao, 1996). La atmósfera contiene cantidades variables de sulfuro de carbonilo (COS), sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de azufre (SO_2), y otros gases sulfurosos, además de partículas de polvo que contienen S. Estas formas emergen desde erupciones volcánicas, volatilización desde el suelo, desprendimientos oceánicos como pequeñas gotas, incendios de plantas o rastrojos y emisiones de plantas industriales (Echeverría, 2005).

El S orgánico se agrupa bajo la forma oxidada, mayoritariamente como ésteres sulfato, y en la forma reducida como aminoácidos (S ligado al C). En períodos durante los cuales se realizan aportes de sulfato inorgánico (con fertilización), se producen generalmente incrementos en los contenidos de S bajo la forma de éster sulfato. Esta fracción es susceptible de ataque microbiano (en condiciones de aerobiosis y humedad en el suelo) y por lo tanto una fuente potencial de S para los cultivos (Scherer 2001, Echeverría 2005).

La materia orgánica particulada (MOP) es la fracción más dinámica o lábil de la materia orgánica del suelo (MOS), por lo tanto, es la que está más relacionada con la disponibilidad de nutrientes. Se ha determinado una estrecha relación entre el contenido de partículas finas y el S que es la materia orgánica asociada a la fracción mineral (MAOM); lo que sugiere que la asociación entre el S total y la materia orgánica del suelo no implica siempre una relación directa con la disponibilidad de S. En suelos de texturas gruesas se mineraliza una proporción mayor que en los de textura fina, y a su vez como la liberación de sulfato depende principalmente de procesos microbianos, el abastecimiento de sulfato en el suelo varía con los cambios de los factores ambientales (Echeverría 2005, Jamal et al. 2010).

Echeverría et al. (1996), utilizando técnicas de incubación de muestras de suelo en laboratorio, encontraron que, si bien en los primeros momentos de incubación la relación N/S se reduce, posteriormente se mantiene estabilizada en valores cercanos a 12/1. Por otra parte, los valores más frecuentes citados en la bibliografía se encuentran cercanos a 6-8/1 (Tisdale et al., 1993). Esta constancia en la relación N/S es la que permite estimar el azufre mineralizado conociendo el nitrógeno mineralizado. La evolución de la relación N/S mineralizado indica que en los primeros días de incubación se produce una mayor liberación de N en comparación al S proveniente de un compartimento lábil de la materia orgánica más rica en N (Echeverría et al., 1996). Estos resultados fueron obtenidos en laboratorio y concuerdan con los que señalan que la relación N/S de la materia orgánica de los suelos cultivados es generalmente menor que en los de aquellos sin cultivar, lo que sugiere que el S es relativamente más resistente a la mineralización que el N o bien que la liberación de éste es proporcionalmente mayor que la de S (McGill y Coles, 1981). Esto cobra relevancia práctica al contribuir a

explicar la temprana aparición de deficiencias de N en los suelos cultivados en relación al S (Echeverría, 2005).

La agricultura intensiva asociada al uso de cultivos mejorados y con alto uso de fertilizantes ha llevado al agotamiento de los nutrientes por lo tanto a un desequilibrio. Esto asociado a que hubo por un largo período un mayor uso de fertilizantes con N y P en reemplazo del S, lleva a que se limite la eficiencia del N, el cual si esta alrededor de 7/1 resulta en rendimientos reducidos (Jamal et al., 2010).

El N y S están estrechamente relacionados ya que el S juega un papel importante en la activación de la enzima nitrato reductasa, la cual interviene en la conversión de nitrato a aminoácidos en la planta. Otros autores sostienen que el S interfiere en la respuesta al N, pudiendo provocar la falta de respuesta por este o que la misma sea negativa (Nattal, citado por Martino y Ponce de León, 1999). A su vez cuando solo se considera el N y S proveniente del fertilizante una condición de estrés hídrico podría demorar la acumulación de N alterando las diferencias entre los momentos de acumulación de estos nutrientes. Por lo que se puede concluir que la absorción de S desde el suelo durante el ciclo del cultivo sería más importante que la removilización (Echeverría, citado por Boga, 2014).

Debido a que ocurren procesos de acumulación de SO_4^{-2} intercambiable en horizontes sub-superficiales, es importante que las plantas puedan desarrollar plenamente el crecimiento de raíces en profundidad. Una condición sub-óptima del suelo para el crecimiento radical, como puede ser la compactación, la acidez o la acumulación de sustancias tóxicas, puede impedir el aprovechamiento del SO_4^{-2} de distintos estratos del suelo (García Lamothe y Quincke, 2011).

2.2.1. Procesos de inmovilización - mineralización

La inmovilización de sulfato a formas orgánicas está fuertemente influida por la disponibilidad de sustrato. Con el agregado de residuos orgánicos de cosecha en superficie la incorporación de sulfatos a formas orgánicas ésta aumenta (Melgar y Gearhart, 2006). Y es por esto que como la inmovilización esta correlacionada positivamente con la relación C/S, la incorporación de pajas de cereales aumenta la inmovilización del azufre (aumenta la relación C/S). Esta relación C/S por encima de 400/1 determina inmovilización en el sistema, disminuyendo su disponibilidad a los cultivos en el corto plazo, así como el potencial de pérdidas por lixiviación (Melgar y Gearhart, 2006). Chapman et al. (1996), determinaron que la relación crítica de S en los residuos para la inmovilización es de 1,3 g S kg^{-1} de materia seca, o en este caso su equivalente a una relación C/S de 340/1.

Las formas orgánicas de S deben ser mineralizadas para poder ser tomadas por las plantas. La tasa de mineralización de S depende de los mismos factores ambientales

que afectan la mineralización del N (humedad, aireación, temperatura y pH (Echeverría, 2005), por lo tanto existe una estrecha relación entre la mineralización de estos dos nutrientes. La mineralización del azufre orgánico se da por la utilización microbiana del esqueleto de carbono de la materia orgánica. El azufre mineralizado de 1% del azufre total, puede alcanzar al 3% en promedio de los residuos orgánicos (Melgar y Gearhart, 2006).

Usando S^{35} marcado y lisímetros, Sakavedan et al. (1993) cuantificaron como mineralización neta entre 30 y 60 kg de S. año⁻¹ en sitios bajo praderas de baja y alta fertilización respectivamente, bajo las condiciones ambientales mencionadas previamente.

Más de la mitad del S está en forma reducida ligada al C, mayormente en proteínas y aminoácidos tales como cisteína, cistina y metionina. Estos materiales están ligados al humus y a las arcillas, y de este modo están relativamente protegidos del ataque microbiano (Echeverría, 2005). La mineralización de esta fracción es debida a la oxidación del C por los microorganismos del suelo y es controlado por el requerimiento de energía y esqueletos carbonados para su mantenimiento y crecimiento. El sulfato es liberado como un subproducto de la descomposición de la materia orgánica y la mineralización del azufre se produce cuando las condiciones son favorables para la actividad microbiana en general (temperatura, humedad, pH y disponibilidad de sustrato). Esta vía de mineralización de azufre es denominada biológica (Torres Dugan y Rodríguez, 2009).

La otra vía es la bioquímica que implica hidrólisis extracelular de S orgánico por exoenzimas de un compartimento microbiano que contiene S en forma oxidada como el éster sulfato (C-O-S). En esta fracción el S (bajo la forma de éster sulfato) está ligado al O₂ y es relativamente más lábil que el S ligado al C. Es por esto que se ha sugerido considerar esta fracción a la hora de evaluar el S disponible para los vegetales. Con el tiempo los microorganismos del suelo rompen estos componentes azufrados en formas inorgánicas y el producto final de la oxidación es la formación de sulfato. Los compuestos orgánicos más fáciles de degradar en el suelo son los ésteres de sulfato, desde los cuales los microorganismos liberan directamente el sulfato (Brady y Weil, 1999).

El azufre mineralizado puede ser estimado a partir del conocimiento de la mineralización del nitrógeno. La ventaja de este procedimiento radica en que el conocimiento científico local generado sobre la dinámica del nitrógeno es bastante más abundante, y además las técnicas analíticas de su determinación en laboratorio son más simples, rápidas y más baratas que para el azufre. Para efectuar esta estimación es fundamental conocer la relación N/S.

2.2.2. Procesos de lixiviación o lavado

Los fertilizantes azufrados no utilizados por el cultivo son altamente susceptibles de perderse, por lo tanto, no deben ser aplicados en períodos lluviosos y sin cultivo. Los valores de pérdida, si bien no hay métodos sencillos y precisos para determinar el lavado de sulfatos, se han obtenido valores de pérdida que oscilan entre los 30 y 80 kg/ha/año y en suelos fertilizados pueden llegar a 110 kg/ha/año (Scherer, 2001).

El lavado es uno de los principales mecanismos de pérdida de azufre, además de la extracción por los cultivos. Es por esto que las características del suelo que afectan el transporte de agua a través del mismo, el balance precipitación- evapotranspiración, el tipo y estadio del cultivo, y su tasa de extracción de nutrientes influyen en la magnitud de las pérdidas totales de S de un suelo (Melgar y Gearhart, 2006).

En suelos con texturas más arenosas en los horizontes superficiales, en condiciones de siembra directa hay un mejor movimiento del agua que da como resultado una mejor infiltración y aprovechamiento del agua de lluvia debido a que hay abundancia relativa de macroporos. Al ser estos el canal preferencial de movimiento del agua gravitacional, es en condiciones de barbecho, sin raíces activas, que se dan las mayores pérdidas de azufre (Melgar y Gearhart, 2006). En el esquema agrícola que predomina en el Uruguay no siempre se dan estas condiciones que favorecen altas tasas de infiltración, el lavado dependerá de la magnitud de la lámina de agua drenante, de la textura del suelo y de la presencia de elevada concentración de sulfato en el suelo (Echeverría, 2005). Es por esto que, al integrar las características de las fuentes con el tipo de suelo, determinadas condiciones favorecen la pérdida por lavado de los sulfatos como por ejemplo suelos con pH mayor a 6 de textura franco arenosa, altas precipitaciones post aplicación y utilización de fuentes solubles. Por el contrario, suelos molisoles (de tipo brunosoles) con pH ligeramente ácidos y alta saturación de bases intercambiables minimizarían dichas pérdidas (Reussi Calvo y Echeverría, 2009).

Un factor de suelo que afecta la velocidad de lixiviado de los sulfatos, además de las características hídricas del perfil, es la competencia con el fósforo. El fósforo mineral en el suelo se encuentra como aniones (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}) adsorbidos a los coloides del suelo (dependiendo la presencia relativa de cada anión del pH del suelo). El ion sulfato compite con los iones fosfato por los sitios reactivos, que son limitados a un pH determinado, por lo tanto el agregado de fertilizantes fosfatados acentúa la competencia aniónica, desplazando el ion sulfato desde los sitios de adsorción hacia la solución del suelo, donde queda predispuesto a moverse con el agua gravitacional ante un evento de lluvia o riego (Melgar y Gearhart, 2006). Por tales razones, el S- SO_4 que se encuentra débilmente retenido respecto al fosfato, la fertilización con P reduce la adsorción del S que quedará disponible para la planta pero también quedará expuesto a la pérdida por lixiviación.

El S ingresa en la raíz mayoritariamente como sulfato y es transportado vía xilema. El sulfato en exceso es depositado en las vacuolas, y si bien este compartimento constituye una reserva para los vegetales, la removilización de este sulfato es relativamente lenta, puesto que es liberado solo ante condiciones de estrés prolongado (Blake-Kalf et al., 1998). El azufre luego que está en las células tiene poca movilidad, debido a este motivo las deficiencias comienzan a manifestarse en las hojas más jóvenes (Thomas, citado por Martino y Ponce de León, 1999).

Si el aporte de sulfato desde el suelo es restringido, una parte de los requerimientos de S de los vegetales pueden ser cubiertos por vía foliar. La absorción se realiza a través de los estomas y la resistencia interna del mesófilo determina la velocidad de ingreso. Por otra parte se han determinado pérdidas de H_2S y otros gases azufrados volátiles vía estomática y se asume que este sería un mecanismo de detoxificación en un ambiente con exceso de S.

La acumulación de S es demorada respecto a la de N por lo que se esperaría tener una mayor ventana de aplicación y respuesta. Monaghan et al. (1999), reportan en cebada a antesis el cultivo acumuló aproximadamente entre 70-75% del N y 50- 60% del S que tendrá en madurez fisiológica. Resultados que coinciden con los determinados en trigo por Reussi Calvo y Echeverría (2009) y en maíz por Pagani et al. (2009). Monaghan et al. (1999) determinaron que el 50% del S acumulado en el grano a cosecha proviene de la absorción postantesis, similares resultados fueron obtenidos en cebada (Eriksen, 2005). En situaciones de adecuada disponibilidad hídrica y suministro de S es de gran importancia la acumulación tardía de este nutriente, por lo tanto la acumulación demorada de S respecto a N es un aspecto que debe ser considerado al momento de definir la estrategia de fertilización azufrada (Reussi Calvo y Echeverría, 2009).

2.3. DIAGNÓSTICO DE LA DEFICIENCIA

Las deficiencias de azufre comenzaron a manifestarse y a difundirse a nivel global hace relativamente pocos años, en regiones donde hasta hace poco tiempo la disponibilidad de este nutriente resultaba suficiente (Eriksen, 2005). En Uruguay en la última década se comenzaron a manifestar deficiencias de S (Hoffman et al., 1999). A raíz de estos hechos se comenzó a estudiar y a profundizar en indicadores de diagnóstico de deficiencias. Los índices de disponibilidad de S serían necesarios para poder realizar un uso racional de los fertilizantes, evitar pérdidas en rendimiento y calidad de los granos cosechados (Zhao et al. 1999, Blake-Kalff et al. 2002).

En general, cuando el nivel de $S-SO_4^{-2}$ es inferior a 5 a 6 ppm es frecuente encontrar respuesta positiva al azufre, no obstante esta respuesta es muy variable dependiendo de condiciones edafoclimáticas o específicas del cultivo. Con valores por encima de 10 a 12 ppm es menos probable encontrar respuesta al S, aunque según

García Lamothe (2002), Morón (2005), García Lamothe y Quincke (2011), es poco frecuente encontrar valores tan altos.

El agregado de S mejora sensiblemente la producción de biomasa, rendimiento en grano, índice de cosecha o ambos en distintos cultivos, particularmente a dosis elevadas de N (Salvagiotti et al. 2009, Mazzilli y Hoffman 2010, Reneau Jr et al., Salvagiotti y Miralles, García y Salvagiotti, Fontanetto et al., Hoffman et al., citados por Hoffman et al. 2015).

En cuanto a suelo, se han desarrollado métodos que permiten extraer el S como sulfato con distinto grado de retención y el S liberado durante incubaciones o crecimiento microbiano. La concentración de S inorgánico en el suelo varía durante el año y es influenciada por varios factores como son el crecimiento de los cultivos, el lavado, el escurrimiento superficial, la actividad de la biomasa microbiana, la aplicación de fertilizantes y el aporte de S atmosférico. Es por esto que el contenido de sulfato determinado en una muestra de suelo es válido únicamente para el momento en que la misma fue extraída (Schung y Haneklaus, 1998).

Al presente no se ha logrado desarrollar un método de análisis de S en muestras de suelo lo suficientemente económico, rápido y confiable, a fin de identificar sitios con deficiencia y que permita caracterizar la disponibilidad de S para los cultivos (Echeverría, 2005). Se han propuesto muchos indicadores de deficiencia de S (Schung y Haneklaus 1998, Blake-Kalff et al. 2002), ejemplos de estos indicadores son S total, sulfatos, S orgánico etc., pero ninguno de estos ha sido elegido como el más satisfactorio, aunque los indicadores más usados son el contenido de S en suelo y en planta y la relación N/S.

Scott et al. (1984), Zhao y McGrath (1994), propusieron el análisis de suelo como un indicador de disponibilidad de S para el crecimiento vegetal, pero sin embargo teniendo en cuenta la movilidad de éste en el suelo y los efectos de factores tales como variación del clima y la profundidad del nivel freático, el análisis de suelo es insuficiente para predecir deficiencias de S (Verlinden, citado por Mathot et al., 2009). Pagani y Echeverría (2011) al igual que los autores precedentes, coinciden en la falta de adecuados indicadores de suelo para estimar la disponibilidad de $S-SO_4$ y que a su vez sean buenos predictores de la respuesta vegetal.

Reussi Calvo y Echeverría (2009), sugieren la relación N/S total en planta como indicador de diagnóstico, proponen dos métodos para estimar la concentración de nitrógeno y azufre total en planta en el cultivo de trigo. Uno de los métodos probados fue el tradicional de Kjeldahl y el otro método fue el de combustión seca de Dumas (Crosland et al., 2001). Con esta metodología la muestra de planta es rápidamente oxidada a altas temperaturas y el S es determinado por detección infrarroja. En este estudio se obtuvo una correlación significativa entre los dos métodos, en el caso del N

hubo menores coeficientes de variación en el método de Dumas. Para el caso del S hubo una subestimación del 20% en la concentración de S por el método de turbidimetría respecto al método de Dumas. Además la proporción de S recuperado de una muestra estándar por el método turbidimétrico fue solo 83%, mientras que por el método de Dumas fue 96%. Es por esto que cuando se recupera el S por turbidimetría se afecta la estimación de la relación N/S para el diagnóstico de este elemento. Este método tiene la ventaja de ser más preciso que los turbidimétricos tradicionalmente usados, tiene mayor exactitud y corto tiempo de análisis (Crosland et al. 2001, LECO, citado por Pagani y Echeverría 2011).

A nivel de planta el S determinado por distintos métodos está relacionado con la cantidad de S disponible para el cultivo a un momento dado (Melsted et al., 1969). Se han propuesto síntomas visuales de deficiencia, S total (Pinkerton, 1998), sulfato (Scaife y Burns, 1986), porcentaje de sulfato como S total (Spencer y Freney, 1980), pero los valores críticos de estos indicadores varían en gran medida con el estado de crecimiento del cultivo, la parte de la planta analizada y el método analítico empleado, lo cual limita su utilización para recomendaciones de rutina (Rasmussen et al. 1977, Spencer y Freney 1980, Blake-Kalff et al. 2002).

En otros estudios realizados por Vong et al. (2007) en *Brassica napus* y *Hordeum vulgare* (ambos elegidos por su contraste en necesidades de S *Brassica* > *Hordeum*), se pudo observar que la acumulación de S en los brotes era una función exponencial de la biomasa aérea, lo que llevó a que se fuese sugerida al contenido de S en los brotes como un posible índice de nutrición de las plantas. Por otra parte también se observó en este experimento que tanto el tipo de suelo y determinadas especies de plantas determinan diferentes transformaciones de S derivadas de los fertilizantes. Igual es necesaria mayor información para confirmar estos resultados en condiciones de campo y mejorar la caracterización del S (Vong et al., 2007).

Mathot et al. (2009) en estudios realizados en gramíneas también concluyeron que el S en planta podría utilizarse como un índice para predecir el estatus nutricional, encontrando que cultivos con un contenido de S que van desde 0,95 mg S. g⁻¹ MS (Helgadottir, citado por Mathot et al., 2009) a 2,5 mg S.g⁻¹ MS (Eppendorfer, 1976) o con un relación N/S de 14 (Bolton et al., 1976) a 20 (Eppendorfer, 1976) responden positivamente a la fertilización con S (Mathot et al., 2009). Rasmusseu et al. (1977), sugirieron que la relación N/S es mejor indicador del estatus azufrado del tejido vegetal que la concentración de S. Sin embargo Pagani y Echeverría (2011), encontraron que la relación N/S en planta en el cultivo de maíz no contribuyó a caracterizar el estatus del cultivo en estadios tempranos de desarrollo, pero en madurez fisiológica la relación N/S resulto ser un indicador aceptable del estatus azufrado del cultivo, la relación fue de 11/1. A su vez algunos estudios realizados en maíz y en otros cultivos han reportado que valores de relación N/S mayores a 16/1 indican insuficiente S para la formación de proteínas (Terman et al., citados por Pagani y Echeverría, 2011).

La determinación de la relación N/S total en grano en trigo, es un buen estimador del estatus azufrado del cultivo (Randall et al. 1981, Withers et al. 1995). Reussi Calvo et al. (2011) obtuvieron un 98% de sitios correctamente diagnosticados utilizando los umbrales de S en grano de 0,15% y relación N/S de 13,1/1. Si bien este método no es válido para corregir deficiencias de S en el trigo, podría ser utilizado como un indicador del problema y para futuras fertilizaciones en la rotación.

Respecto al uso de la relación N/S total en biomasa aérea como método de diagnóstico de deficiencia de S, constituye un método de diagnóstico satisfactorio, ya que la relación N/S crítica fue levemente afectada por el momento de muestreo y por lo tanto se podría utilizar una relación N/S crítica promedio de 15,5/1, para el período que va desde macollaje hasta fin de encañazón del trigo (Reussi Calvo et al., 2008). Por encima de la relación N/S antes mencionada es probable que se presente deficiencia de S en el cultivo de trigo. Para situaciones sin limitaciones de N e hídricas la acumulación de S en planta es demorada respecto a la de N (Reussi Calvo et al., 2008), por lo tanto la ventana de aplicación de los fertilizantes azufrados para el cultivo sería mayor que la de N.

En la actualidad según Boga (2014) no se ha logrado desarrollar un método de diagnóstico de deficiencia de S basado en el análisis de suelo lo suficientemente robusto, económico y rápido que permita caracterizar la disponibilidad de S de los cultivos. Esto explicado por la poca precisión de los métodos que además requieren equipamiento y reactivos de alto costo y son poco prácticos. Por lo tanto la aplicación de dicho nutriente se realiza rutinariamente con dosis de 10 a 15 kg S ha⁻¹ en áreas donde se han observado respuestas en los cultivos previos.

Prystupa et al. (2007) determinaron una respuesta promedio al agregado de S de 112 kg ha⁻¹, siendo baja la asociación entre el nivel de S-sulfato en suelo a la siembra y la respuesta a S. Estos resultados sugieren que el método de análisis de suelo no representa una alternativa precisa para el diagnóstico de los requerimientos de S para los cultivos de invierno incluyendo cebada.

2.4. RESPUESTA VEGETAL

Se analizó que los factores de producción han llevado a la reducción de la oferta de S desde el suelo, el menor aporte de S atmosférico, sumado a la creciente tasa de extracción anual de este nutriente por los cultivos, y mayor demanda por parte estos últimos, incrementa y explica el aumento muy importante en las probabilidades de encontrar respuestas al agregado de S (Roberts, 2007).

Cuando el cultivo crece en ambientes con deficiencia de azufre además de la disminución en el rendimiento y menor calidad de los granos cosechados (Scott et al. 1984, McGrath y Zhao 1996, Zhao et al. 1999) también se reporta mayor susceptibilidad a enfermedades, reducción en la eficiencia de uso de otros nutrientes, como por ejemplo N, P y micronutrientes como Zn, Fe, Cu, Mn y B (Torres Dugan y Rodríguez, 2009).

La respuesta al agregado de S en soja, trigo y maíz se encuentra en lotes con prolongada historia agrícola, con bajos contenidos de materia orgánica y preferentemente bajo el sistema de siembra directa (Vilche et al., 2002). Bajo este sistema con menor temperatura y la ausencia de remoción del suelo, se genera una condición menos favorable para la mineralización del S. Los cultivos de segunda (ya que se implantan luego de la cosecha de los cereales de invierno) generalmente manifiestan aún mayor deficiencia y respuesta al S, posiblemente por el mínimo tiempo de barbecho (Martínez y Cordone, 1998).

En el Reino Unido se llevaron a cabo ocho experimentos en el año 2003-04 para evaluar los efectos de la aplicación de S sobre el rendimiento y calidad maltera de cebada (Zhao et al., 2005). En cinco de los ocho experimentos se obtuvo respuesta significativa en rendimiento, entre los 200 a 1200 kg.ha⁻¹, además en dos de los cinco sitios deficientes la aplicación de S aumentó significativamente la calidad de la malta obtenida. Cuando el N en suelo fue limitante la aplicación de S aumentó el rendimiento generando un efecto de dilución del N en grano. En este experimento la respuesta se obtuvo en suelos que presentaban menos de 5,4 ppm de S y con el agregado de 10 a 20 kg.ha⁻¹ de S. Por lo que la eficiencia en el uso de azufre (EUS) varió entre los 20 a 60 kg de grano por kg de S aplicado, dependiendo de la dosis aplicada y de las condiciones del cultivo.

A nivel nacional existen antecedentes en el cultivo de colza en el litoral Norte del país, en el que la adición de 20 kg de S ha⁻¹ produjo un incremento en el rendimiento cuatro veces superior al testigo sin S (Mazzilli y Hoffman, 2010). Según Ferreira (2014) la relación N/S no resultó útil en predecir el estado nutricional del cultivo de colza para el crecimiento. Para este autor, el mejor indicador resultó el Índice de Nutrición de Azufre (INS) elaborado a partir de las curvas de dilución de dicho nutriente, encontrando que para obtener un 90% de MS es necesario 0.88 de INS por debajo de este valor el incremento es lineal.

2.4.1. Respuesta al agregado de nitrógeno en función de la disponibilidad de azufre

Existe una gran cantidad de nutrientes que presentan interacciones positivas, pero nitrógeno y azufre tienen una interacción de particular importancia, varios ensayos de fertilización han demostrado que la productividad de los cultivos de cereales está sustancialmente mejorada bajo fertilización conjunta con N y S (Mathot et al. 2009, Salvagiotti et al. 2009).

El N y el S deben estar en equilibrio para obtener los rendimientos óptimos, ya que cuando se aplica S en ausencia de N disminuye la concentración de N en planta, pero cuando este se agrega ocurre un efecto sinérgico. A su vez cuando la aplicación de S no tiene un efecto apreciable sobre la absorción de N, se puede observar que mejora la producción de materia seca (Jamal et al., 2010). En algunos estudios se encontró que la deficiencia de S conduce a una disminución de la actividad nitrato reductasa y en la absorción de N-NO_3 en relación a la de N-NH_4 (Clarkson et al. 1989, De Bona et al. 2011). Esta observación indicaría que el suministro de N-NO_3 puede ser una fuente menos efectiva bajo condiciones de deficiencia de S en comparación a las formas reducidas de N como el N-NH_4 (De Bona et al., 2011).

Las concentraciones de N en planta se mejoran con el suministro de N. Según De Bona et al. (2011) las mismas pasarían de aproximadamente 25 g kg^{-1} a $43\text{-}48 \text{ g kg}^{-1}$. Bajo condiciones de deficiencia de S, la concentración de N fue mayor en plantas fertilizadas con formas nítricas que amoniacales. El exceso de N en las plantas se acumula bajo la forma de N-NO_3 , por lo tanto cuando hay deficiencias de S se presenta una acumulación de N-NO_3 2,5 veces mayor, lo que indica que la reducción de éste por la nitrato reductasa fue limitada por el S. También hay evidencias que sugieren que la deficiencia de S (en tabaco) es responsable de la depresión de la nitrato reductasa provocando la acumulación excesiva de glutamina y aspargina (Migge et al., 2000). Ello llevaría a que la asimilación de N-NO_3 actúe como una señal para muchos procesos metabólicos ya que tiene una sensibilidad especial por la oferta limitada de S. A pesar de una serie de estudios que muestran la dependencia de la utilización de N en función de la disponibilidad de S, se sabe poco acerca del uso de distintas fuentes de N (Salvagiotti et al. 2009, De Bona et al. 2011).

Cazabán y Rubio (2014), encontraron en las condiciones de Uruguay respuestas al agregado de S de $71,5 \text{ kg de grano kg S}^{-1}$ en el cultivo de maíz. Capurro et al. (2007), encontraron en Santa Fe que la respuesta a N fue lineal en el rango de dosis de N explorado (desde 60 hasta 150 kg.ha^{-1}). En estos trabajos se duplicó la respuesta al agregado de N cuando éste fue acompañado con S, pasando de 16 a $30,6 \text{ kg ha}^{-1}$ por cada kg de N aplicado. La respuesta al S fue significativa con altas dosis de N e incrementándose la misma al aumentar la dosis de N, demostrando una clara interacción N-S. En el Sur de Santa Fe se determinó que la fertilización con S incremento los rendimientos en promedio 673 kg ha^{-1} , dependiendo del año y la dosis de N. La respuesta se explica por la prolongada historia agrícola de las chacras, los bajos niveles de S-SO_4 y las caídas de MO respecto a los niveles originales (Capurro et al., 2007).

2.4.2. Manejo de la fertilización nitrogenada para cereales de invierno en Uruguay

En las condiciones actuales del esquema agrícola en el Uruguay se detecta una disminución en la EUN. Aun en situaciones de adecuado manejo del N se ve una limitante en el uso de éste por parte de los cultivos, hecho que lleva a suponer que hay otro nutriente que está limitando el uso del mismo. A su vez ha aumentado la frecuencia de situaciones con respuesta al S en interacción con el N.

Las características climáticas, las variaciones en suelo, historia de chacra y el antecesor en Uruguay hacen que las variaciones en la capacidad de aporte de N entre chacras y años sean muy importantes. Esta realidad ha sido reconocida desde hace muchos años, por lo que se ha desarrollado un modelo con el fin de racionalizar el agregado de N. Este modelo, trata de objetivizar la decisión de cuándo y cuánto N agregar, mediante el uso de los mejores indicadores de respuesta para cada estadio de estos cultivos de invierno en Uruguay (Hoffman et al., 2001). El modelo en cebada surge de una propuesta de UdelaR. Facultad de Agronomía con financiación de la FAO. PNUD y por la Mesa Nacional de Entidades de Cebada Cervequera (MNECC), y MGAP para su validación en trigo (Perdomo et al. 1999, Hoffman et al. 2001, Hoffman et al. 2010). El mismo se basa en el desarrollado por Baethgen (1992) y validado por Hoffman y Ernst (1996) en cebada cervequera.

La cantidad de N mineral para la absorción en etapas más avanzadas del cultivo como el macollaje, va a estar determinado por eventos ocurridos en el período siembra – macollaje. Como la magnitud de estos eventos es de difícil predicción resulta necesario evaluar mediante indicadores la disponibilidad de N en ese momento y así decidir las necesidades de fertilización en forma objetiva. La aplicación de parte del N en esa etapa, o sea el fraccionamiento, tiene la ventaja de que se realiza en un momento de rápida absorción de N y por lo tanto la eficiencia de utilización del N por el cultivo es mayor.

El manejo de N propuesto para cebada cervequera y trigo se basa en las siguientes determinaciones en tres momentos del ciclo del cultivo.

1er. momento: determinación a siembra de N-NO_3^- en suelo de 0 a 20cm. Se establece como nivel crítico 16 a 18 ppm en función del grado de respuesta del suelo, los suelos del grupo A son ambientes de alta respuesta (resultado de una combinación de chacras viejas, rastrojos de sorgo y/o barbechos cortos) y los del grupo B que son ambientes de baja respuesta (resultado de chacras nuevas, rastrojos de girasol y soja y adecuado largo de barbecho, Perdomo et al., 1999). Para este momento el equivalente fertilizante es de 5 UN para los suelos de alta respuesta con un máximo de 45 UN, para el caso de los suelos de baja respuesta el equivalente fertilizante será 3 UN y el máximo recomendado es de 30 UN.

2do. momento: determinación en estadio Z 2.2 (tres tallos: principal + 2 macollos por planta) del nivel de N-NO_3^- en suelo de 0 a 20 cm. Se establece como nivel crítico de 12 a 14 ppm (Perdomo et al. 1999, Hoffman et al. 2001, Hoffman et al. 2010). En este segundo momento el equivalente fertilizante corresponde a 5,7 UN limitado a 45 UN para el caso de la cebada cervecera para no sobrepasar los niveles de proteína requeridos por la industria.

3er. momento: determinación del N total en planta en Z 3.0 (nudo a nivel del suelo en tallo principal). Se establece un nivel crítico absoluto de 4,2% variable en función del potencial de rendimiento del ambiente (Baethgen, 1992).

La base de esta propuesta para el manejo del N, radica en que el potencial de rendimiento comienza a construirse en las primeras etapas del ciclo del cultivo y se concreta durante el período de encañado-antesis. El ajuste de N a siembra y Z 2.2 permiten por lo tanto construirlo, y a Z 3.0, concretarlo. Si bien este modelo acompaña las necesidades de N por parte del cultivo, en la última década ha aumentado la frecuencia de chacras muy viejas en donde los Nc y la EUN podrían estar cambiando.

2.5 HIPÓTESIS

Se establecen las siguientes hipótesis, las cuales serán respondidas al finalizar el trabajo.

- a) Existe respuesta al agregado de S y este condiciona la respuesta al agregado de N.
- b) Existen indicadores de suelo y planta que permitan predecir la respuesta al agregado de S.
- c) La respuesta al agregado de S es dependiente del tipo de fuente.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento formó parte de una red de experimentos de validación del modelo de nitrógeno propuesto para la fertilización de los cereales de invierno en cebada, por Facultad de Agronomía. En el marco de este experimento se estudió la respuesta al azufre. El trabajo consistió en la instalación de 23 experimentos en el año 2009, en chacras comerciales de productores, ubicados en la zona litoral Oeste del país. De los 23 sitios instalados fueron cosechados 22 ya que uno de ellos se desestimó por daño. La información de cada sitio se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Información de cada sitio experimental

Si tio	Zona	Localidad	Tipo suelo	Antecesor	MOS (%) 0-20 cm	Productividad (*)	Fecha de siembra
1	Norte	Young	Br.Sub.Luv.	Pradera	3,4	Baja	4-jun.
2	Norte	Young	Br.Eut.Tip.	Soja	5,0	Alta	16-jun.
3	Norte	Young	Br.Eut.Tip.	Soja	5,3	Media	29-may.
4	Norte	Young	Br.Eut.Tip.	Pradera	4,7	Alta	03-jun.
5	Norte	Young	Br.Sub.Luv.	Sorgo	3,3	Baja	03-jul.
6	Norte	Young	Br.Eut.Luv.	Girasol	4,7	-	11-jun.
7	Norte	Young	Br.Eut.Tip.	Soja	2,9	-	29-may.
8	Norte	Paysandú	Br.Eut.Luv.	Sorgo	3,6	Media	19-jun.
9	Norte	Paysandú	Br.Eut.Luv.	Sorgo	4,0	Baja	28-jun.
10	Norte	Paysandú	Br.Eut.Tip.	Soja	3,9	Alta	1-jul.
11	Norte	Paysandú	Br.Eut.Luv.	Sorgo	3,3	Baja	15-jun.
12	Norte	Paysandú	Br.Eut.	Soja	3,6	Baja	28-jun.
14	Sur	Flores	Br.Eut.Luv.	Soja	3,4	Media	20-jun.
16	Sur	J. E. Rodó	Br.Sub.Tip.	Soja	3,1	Baja	06-jun.
17	Sur	J. E. Rodó	Br.Eut.Tip.	Soja	2,9	Alta	15-jun.
18	Sur	Palo Solo	Br.Eut.Luv.	Soja	2,0	Media	10-jun.
20	Sur	Carmelo	Br.Sub.Tip.	Soja	2,5	Media	14-jun.
21	Sur	Mercedes	Br.Eut.	Pradera	2,9	Baja	23-jun.
22	Sur	Cardona	Br.Eut.	Soja	4,2	Media	20-jul.
23	Sur	O. de Lavalle	Vert.Rúpt.Lúv.	Soja	3,4	Alta	19-jun.
24	Sur	O. de Lavalle	Vert.Rúpt.Lúv.	Soja	3,0	Alta	11-jun.
25	Sur	O. de Lavalle	Br.Eut.Luv.	Soja	3,7	Alta	17-jul.

Nota: Br.Sub.Luv.= Brunosol Subéutrico Lúvico, Br.Eut.Tip.= Brunosol Eutrico Típico, Br.Eut.Luv.= Brunosol Eutrico Lúvico, Br.Eut.= Brunosol Eutrico, Br.Sub.Tip.= Brunosol Subéutrico Típico, Vert.Rupt.Luv.= Vertisol Rúptico Lúvico.

(*) Productividad: Alta, Media o Baja, en base a criterios subjetivos del técnico.

Las chacras se numeran del 1 al 25, pero las chacras 13 y 15 no se sembraron y la 19 se perdió por granizo.

Para la conducción del experimento los técnicos eligieron las chacras y estimaron la productividad de éstas, haciendo un juicio subjetivo en base al estado de la chacra y antecedentes de la misma. El experimento se dividió en dos zonas Norte y Sur, la zona Norte corresponde a las chacras que están por encima del Río Negro, y la zona Sur corresponde a las chacras que están por debajo del Río Negro. Todos los sitios

fueron cultivados sin laboreo, con excepción del sitio 25 perteneciente al campo experimental de Maltería Uruguay S.A. donde se realizó laboreo convencional.

El manejo general a nivel de cada experimento fue el mismo realizado por el productor, con ajuste de N al momento de la siembra en función de los niveles críticos del modelo propuesto por Facultad de Agronomía. Posteriormente en los estadios de Z 2.2 y Z 3.0 se realizaron los diferentes tratamientos conducidos de forma conjunta por los técnicos de Facultad de Agronomía y las malterías. Las muestras de suelo para el ajuste en Z 2.2 y Z 3.0 fueron tomadas por los técnicos a cargo de las chacras y enviadas a los laboratorios de la Facultad de Agronomía, EEMAC y a INIA. La Estanduela.

El agregado de S surge del ajuste de N en base a los contenidos de este nutriente al momento de los muestreos (siembra y Z 2.2), dado que se usaron fuentes con y sin S para el agregado de N.

3.2. TRATAMIENTOS

Se realizaron seis tratamientos de fertilización en post-emergencia (Z 2.2 y Z 3.0). Estos fueron definidos buscando validar el modelo al modelo de fertilización nitrogenada propuesto por Facultad de Agronomía (Baetghen 1992, Perdomo et al. 1999, Hoffman et al. 2001). Además, se propuso un tratamiento en el cual se eliminaba el muestreo a Z 3.0 y ajuste a Z 2.2 más un 50% adicional a la dosis recomendada por el modelo, y dos tratamientos con agregado de distintas fuentes de S en Z 2.2.

T 1: testigo sin fertilizar en post-emergencia.

T2: ajuste de N en Z 2.2 con agregado según modelo propuesto por Facultad de Agronomía.

T3: ajuste de N en Z 2.2 con agregado según modelo propuesto por Facultad de Agronomía más un 50% de lo recomendado.

T4: ajuste de N en Z 2.2 y Z 3.0 con agregado según modelo propuesto por Facultad de Agronomía.

T 5: ajuste de N y S en Z 2.2 con agregado de N según modelo propuesto por Facultad de Agronomía, la fuente utilizada en este caso fue “Entec 26”.

T6: ajuste de N y S en Z 2.2 ídem T 2 pero la fuente utilizada fue urea y sulfato de amonio.

En todos los casos menos en los tratamientos T5 y T6 la fuente utilizada fue urea. El T3 surgió de la propuesta sugerida por las malterías, en el que se adicionó a Z 2.2 un 50% más de lo recomendado según el modelo, como forma de estudiar el impacto de la simplificación del manejo y evaluar la viabilidad de evitar el muestreo y corrección en dos momentos en pos-emergencia.

La propuesta de ajuste de la fertilización nitrogenada, considera 3 momentos, cuyos niveles críticos de referencia y modelos de ajuste de dosis por debajo del nivel crítico en pos-emergencia se pueden observar en los gráficos que se presentan a continuación.

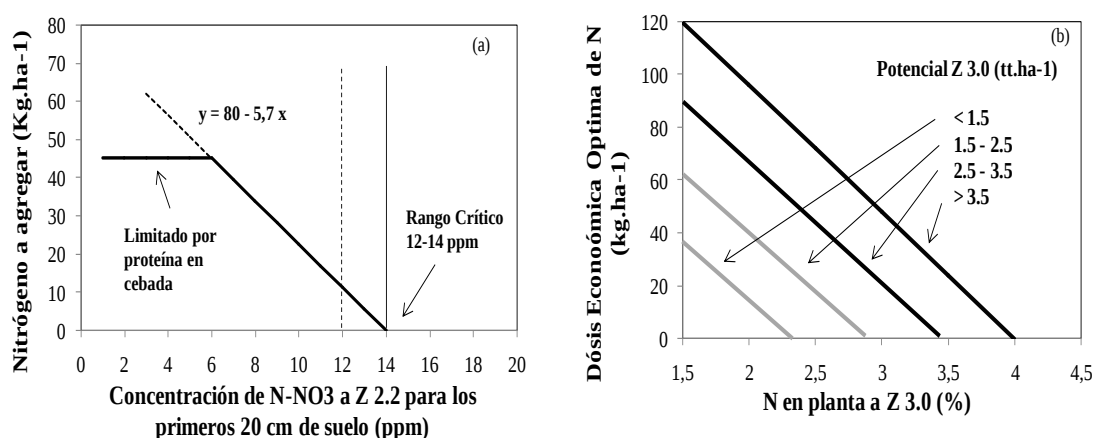


Figura 1. Modelos de ajuste de N

En el tratamiento T6 la dosis de S fue la misma que en el T5 y la diferencia de N se igualó con urea, de modo de que las dosis de N y S resulten iguales en los dos tratamientos y solamente difieran en las fuentes utilizadas. La dosis de S agregada va de 7 a 25 unidades, según la cantidad que había en el suelo al momento de muestreo.

El sulfato de amonio (21-0-0-24) es un fertilizante de origen industrial, y se trata de una fuente de S rápidamente disponible para el cultivo, lo que podría significar una ventaja con respecto a otros fertilizantes azufrados considerando la sincronización con la demanda por parte del cultivo.

En cuanto al "Entec 26", se trata de un fertilizante granulado, composición 26% de N (27% nítrico, 73% amoniacal) y 13 % de S. Los fertilizantes con tecnología ENTEC® contienen una molécula (DMPP) que es inhibidora de la nitrificación, conservando el nitrógeno en forma amoniacal por más tiempo en el suelo, lo que inhibe la acción de las bacterias responsables de la transformación del nitrógeno (nitrificación) en el suelo, asegurando su permanencia en forma de amonio. De esta forma disminuirían las pérdidas de nitrógeno por lixiviación, aunque constituye una fuente de N más lentamente disponible para la planta.

3.3. DETERMINACIONES

3.3.1. Determinaciones a campo

En lo que respecta a determinaciones realizadas en suelo las muestras fueron tomadas en los primeros 20 cm. del perfil.

Al momento de la siembra los técnicos responsables de los cultivos tomaron muestras de suelo y las mismas fueron enviadas al laboratorio para realizar los siguientes análisis:

- N-NO₃, el método analítico empleado es espectrofotometría establecido por Mulvaney en el año 1996.
- P Bray I Espectrofotométrico establecido por Bray y Kurt en el año 1945.
- K intercambiable por fotometría establecido por Isaac y Kerber en el año 1971.
- S-SO₄ por el método turbidimétrico
- MO mediante el método Walkley-Black establecido por Walkley-Black en el año 1982.

Posteriormente en el estadio Z 2.2 los técnicos encargados de cada experimento tomaron una muestra de suelo en la que se realizó análisis de N-NO₃ con el método antes mencionado.

En el estadio de Z 3.0 se realizaron tomas de muestras de planta y determinaron N y S total. El método analítico empleado por los laboratorios para la determinación del contenido de N en planta fue Kjeldalh, en tanto que para la determinación del contenido de S se empleó el método turbidimétrico.

3.3.2. Determinaciones pos-cosecha

Previo a la cosecha se realizó el conteo de espigas, en 4 metros lineales de los surcos centrales de cada parcela, en tanto que para las determinaciones pos-cosecha se tomó una muestra de 8 metros lineales que fue pesada y posteriormente trillada con una trilladora estática, obteniendo la muestra de grano para los posteriores análisis.

- Número de espigas, se realizó un conteo y se calculó la población de espigas por metro cuadrado.
- Materia seca, corresponde a la biomasa total de la muestra luego de secada.
- Rendimiento en grano, luego de trilladas y limpiadas las muestras se pesó el grano obtenido y se calculó el rendimiento de cada parcela.
- Peso de mil granos (PMG), se realizaron tres determinaciones del PMG y se calculó la media, esta se calculó con cuatro submuestras de 100 granos cada una.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El modelo estadístico utilizado fue el de parcelas en bloques completos al azar con tres repeticiones. El diseño es en bloques completos porque en cada bloque se encuentran presentes todos los tratamientos, y al azar porque dentro de cada bloque los tratamientos son asignados a las parcelas en forma aleatoria.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde, μ : media general

τ : efecto tratamiento (n: 0...i)

β : efecto bloque (n: 0...j)

ε : error experimental

Los paquetes estadísticos utilizados para esta red de experimentos fueron el Infostat (versión 2011e) y el SAS JMP 8.

Los contrastes de interés fueron seis:

C1: testigo vs. resto de los tratamientos. Este contraste permite determinar si el tratamiento testigo difiere del resto de los tratamientos fertilizados en pos-emergencia.

C2: T4 vs. T2 y T3. Este contraste permite saber si el modelo de fertilización propuesto por Facultad de Agronomía es diferente de los tratamientos fertilizados con N solo a Z 2.2.

C3: T2 vs. T5 y T6. Este contraste permite evaluar la respuesta al azufre.

C4: T2 vs. T5. Este contraste permite evaluar la respuesta al “Entec 26”.

C5: T2 vs. T6. Este contraste permite evaluar la respuesta al sulfato de amonio.

C6: T5 vs. T6. Esta comparación permite establecer si existen diferencias entre las fuentes de S utilizadas (“Entec 26” vs. sulfato de amonio).

3.5. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

El año 2009 se caracterizó por presentar un mes de agosto cálido, con un promedio de temperatura mayor a la media histórica (figura 2). La temperatura del resto de los meses se presentó muy similar al promedio histórico, y en el período de llenado

de grano en la zona Sur las temperaturas fueron levemente inferiores lo que contribuiría a un mejor llenado de grano (figuras 2 y 3).

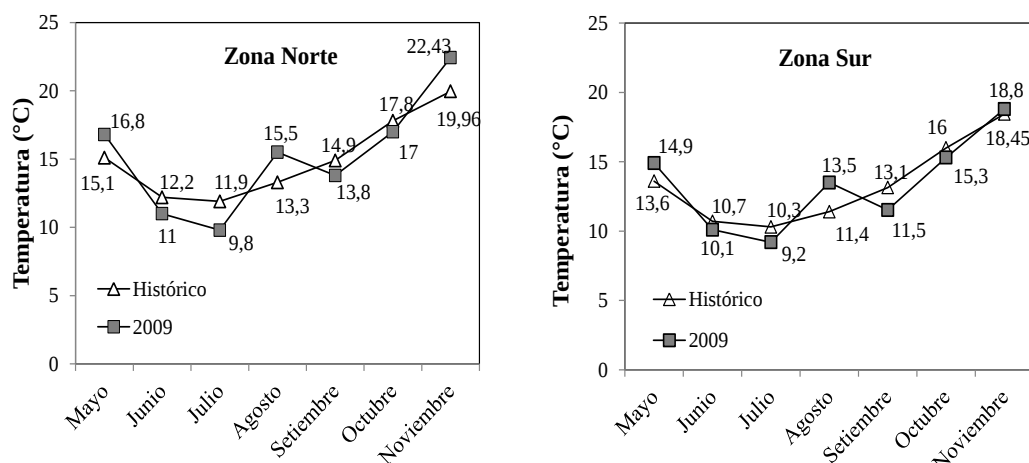


Figura 2. Evolución de la temperatura para la zona Norte y Sur del año 2009 y el promedio histórico para cada zona

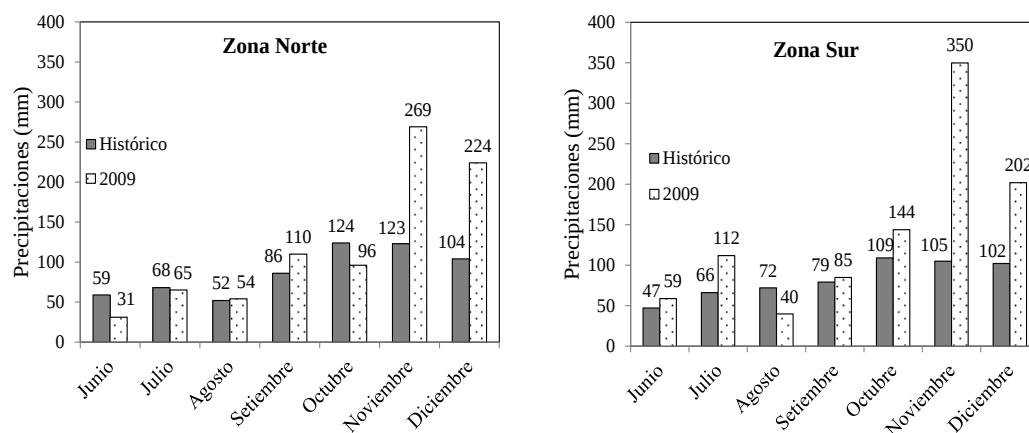


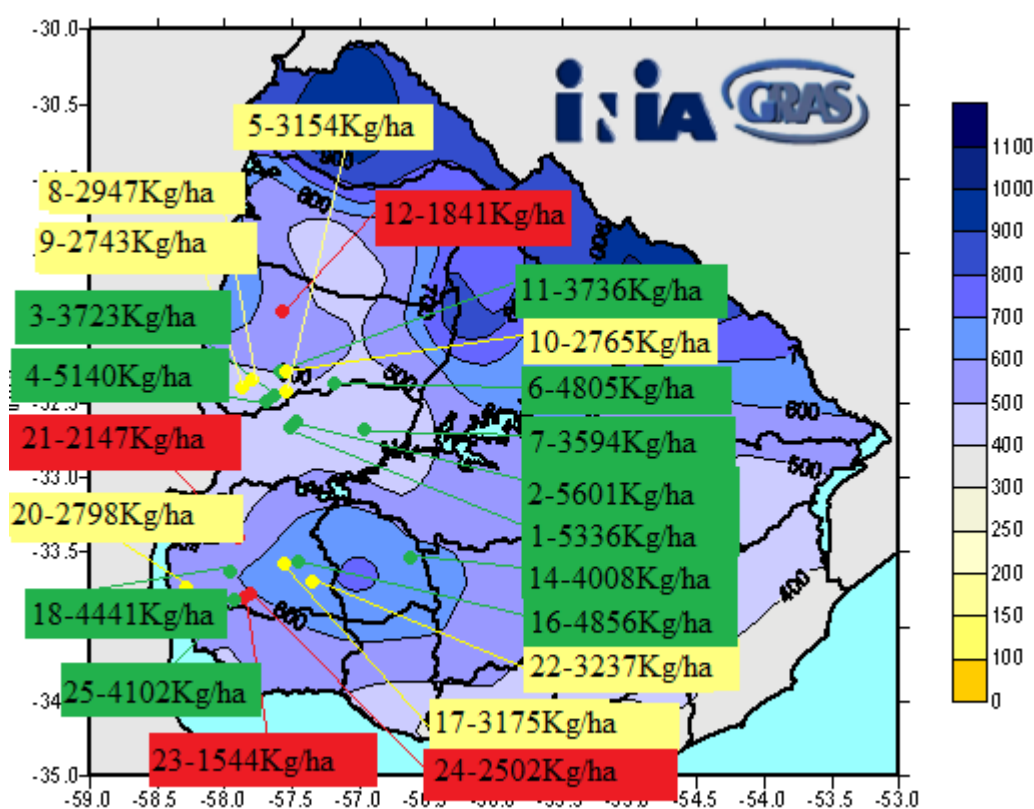
Figura 3. Precipitaciones mensuales y promedio histórico para zona Norte y Sur

El año 2009 se caracterizó por presentar una primavera húmeda, las precipitaciones hasta el mes de octubre se presentaron muy similares a la media histórica tanto para la zona Norte como para la zona Sur, en tanto en los meses de noviembre y diciembre ocurrieron eventos de lluvia que determinaron valores muy por encima del promedio histórico. Los probables excesos de precipitaciones ocurrieron en una fase final de los cultivos, en los que en algunos casos pudo haber afectado la última fase del llenado de grano en las siembras más tardías.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RENDIMIENTO EN GRANO

En la siguiente figura se muestra la ubicación de los sitios experimentales y el rendimiento máximo, sobre un mapa de distribución de las precipitaciones acumuladas para el trimestre setiembre, octubre y noviembre. El rendimiento máximo de cada sitio se establece como el rendimiento mayor para cada sitio obtenido independientemente de cual fuere el tratamiento.



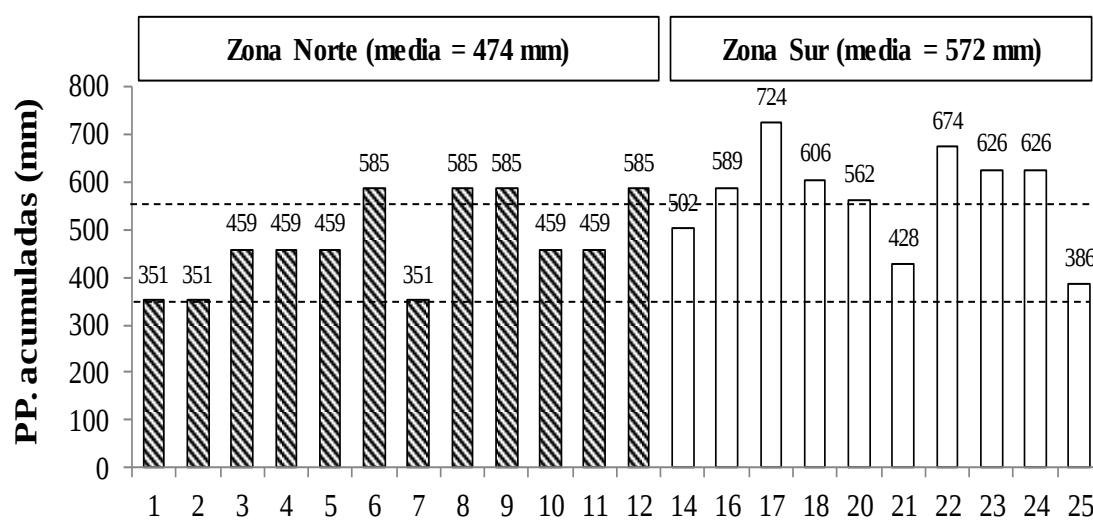
*Los rendimientos de cada sitio se agruparon en tres bandas de potencial (Baethgen, 1992) que comprenden los rangos de: más de 3500 kg.ha⁻¹ banda 4 (color verde), de 3500 kg.ha⁻¹ a 2500 kg.ha⁻¹ banda 3 (color amarillo) y menos de 2500 kg.ha⁻¹ banda 2 (color rojo).

Figura 4. Ubicación geográfica de los sitios y rendimiento potencial, sobre mapa de precipitaciones acumuladas para el trimestre s+o+n 2009

Fuente: adaptado de INIA. GRAS (2009).

Las precipitaciones en general no resultaron limitantes por déficit para la concreción de los potenciales de rendimiento, ya que no se presentó ningún sitio con menos de 350 mm en el trimestre s+o+n, valor que resultaría suficiente (Hoffman y Ernst 2007, Hoffman et al. 2009). Sin embargo, muchos sitios estuvieron más cerca del exceso hídrico, considerándose exceso hídrico aquellos valores por encima de 550mm (Hoffman et al. 2001, Castro et al. 2011).

En la figura 5 se presenta el valor de precipitaciones acumuladas para los meses de mayor demanda del cultivo, y mayor importancia para la concreción del potencial de rendimiento en grano (Hoffman et al. 2001). En este sentido, se observa que las precipitaciones fueron más abundantes para la zona Sur respecto a la zona Norte, encontrándose en la primera el 70 % de los sitios con precipitaciones por encima de los 550 mm y para el Norte el 30% de los sitios.



*Las líneas punteadas corresponden a la zona de suficiencia hídrica para concretar el potencial.

Figura 5. Precipitaciones acumuladas para el trimestre setiembre, octubre y noviembre (s+o+n) según sitio para la región Norte y Sur

A continuación, se presenta un cuadro con la información más relevante que permitirá caracterizar a cada sitio experimental.

Cuadro 2. Caracterización de cada sitio en cuanto a fecha de siembra, cultivar, número de cultivos pos-pasturas, precipitaciones acumuladas y rendimiento potencial

Sitio	Zona	Fecha de siembra	Largo de ciclo (*)	Cultivos pos-pasturas (**)	Precipitaciones acumuladas S+O+N (mm.)	Rendimiento máximo (kg. ha. ⁻¹)
1	Norte	4-jun.	Largo	1	351	5689
2	Norte	16-jun.	Medio	4	351	5601
3	Norte	29-may.	Largo	4	459	3976
4	Norte	3-jun.	Largo	1	459	5140
5	Norte	3-jul.	Medio	3	459	3298
6	Norte	11-jun.	Medio	1	585	4805
7	Norte	29-may.	Medio-Corto	3	351	3594
8	Norte	19-jun.	Medio	3	585	3101
9	Norte	28-jun.	Medio-Corto	4	585	2743
10	Norte	1-jul.	Largo	4	459	2974
11	Norte	15-jun.	Medio	4	459	3736
12	Norte	28-jun.	Medio	7	585	1841
14	Sur	20-jun.	Largo	8	502	4008
16	Sur	6-jun.	Largo	1	589	5166
17	Sur	15-jun.	Largo	5	724	3175
18	Sur	10-jun.	Largo	5	606	4441
20	Sur	14-jun.	Largo	9	562	2982
21	Sur	23-jun.	Medio	0	428	2147
22	Sur	20-jul.	Largo	Sd	674	3237
23	Sur	19-jun.	Largo	8	626	1675
24	Sur	11-jun.	Largo	6	626	2621
25	Sur	17-jul.	Medio	2	386	4102

* Las variedades utilizadas en el experimento se dividen en tres grupos: ciclo medio largo (INIA Arrayán e INIA Ceibo), ciclo intermedio (MUSA 936 y Norteña Daymán) y ciclo corto (INIA Guaviyú y Norteña Carumbé).

** Cultivos posteriores a la última pastura o campo natural.

Sd: sin dato

Para los ciclos medios-largos se puede considerar como fecha de siembra límite el 15 de junio, para los ciclos intermedios hasta fin de junio y para los ciclos medio-cortos la primer quincena de julio (Hoffman y Ernst, 2007). Dentro del total de los sitios experimentales un 25% presentaría un manejo desajustado de la fecha de siembra.

Los mayores rendimientos en grano se observan en la zona Norte con un promedio de 3253 kg.ha⁻¹ (3001; 6717, mínimo y máximo respectivamente), y con precipitaciones que llegan hasta los 550 mm., límite máximo a partir del cual comienza a considerarse alta la probabilidad de exceso hídrico para la cebada. Con precipitaciones

superiores se puede llegar a perder hasta un 60% del potencial, no obstante estas reducciones de rendimiento son con anegamiento desde momentos tempranos de la fase del cultivo (Hoffman et al. 2001, Castro et al. 2011).

La bibliografía es abundante en cuanto al daño provocado por el anegamiento en fases iniciales del cultivo, aunque en el caso de este experimento conducido en el año 2009, el período de exceso hídrico se presentó en la fase final del cultivo por lo que resulta menos clara pero evidente la pérdida de rendimiento asociada a exceso de precipitaciones (figura 6).

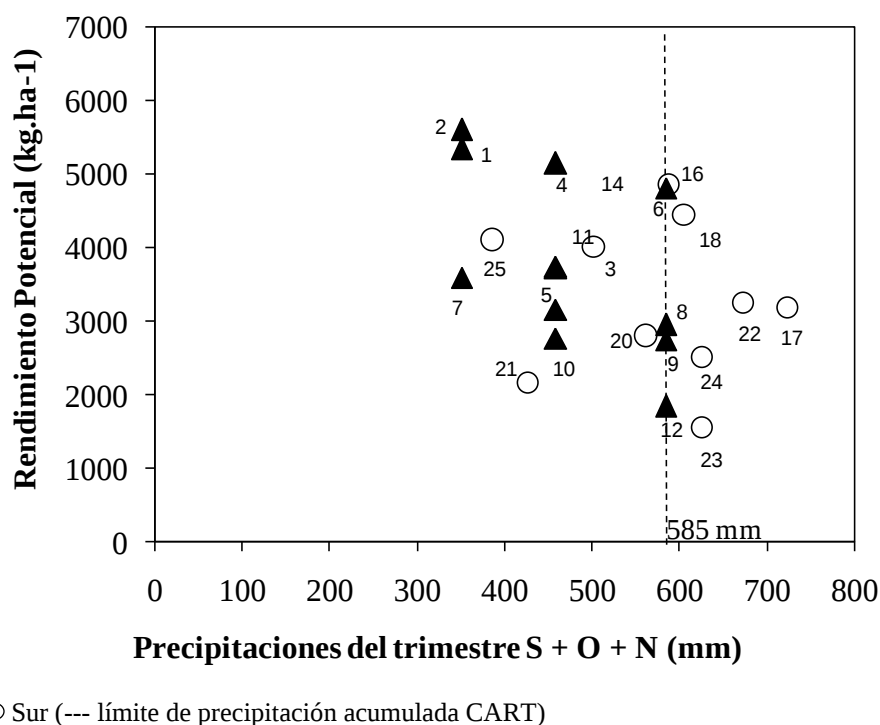
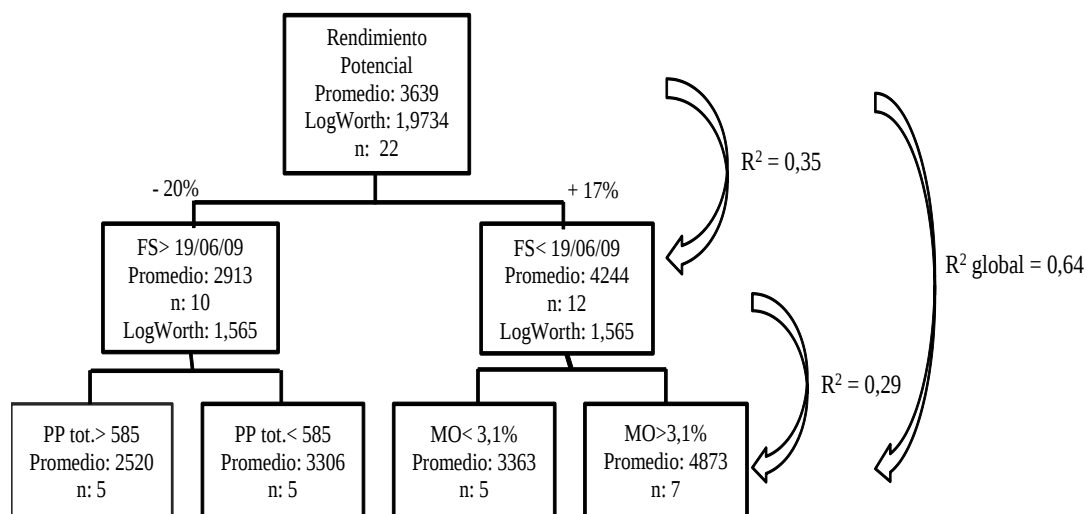


Figura 6. Máximo de rendimiento para cada sitio según precipitaciones acumuladas en el trimestre S+O+N

Si bien el ajuste general entre precipitaciones (S+O+N) y rendimiento máximo no es elevado, claramente se puede observar que los máximos caen cuando aumentan las precipitaciones y los mínimos son más elevados cuando éstas se reducen.

Para poder entender el peso relativo que tuvo cada una de las variables medidas en el experimento en cuanto a explicar la variación del rendimiento obtenido, se procedió a realizar un análisis que permite construir un árbol clasificación y regresión, en el que el conjunto de datos es sucesivamente particionado en subgrupos a partir de una de las variables regresoras. En cada separación el modelo analiza cada una de las

variables regresoras y selecciona las que permiten formar grupos más homogéneos, pero más heterogéneos entre ellos. Para este análisis la variable dependiente fue el rendimiento y como variables regresoras fueron utilizadas: zona, antecesor, productividad, número de cultivos pos-pastura, fecha de siembra, variedad, plantas por metro, P (ppm) a la siembra, N-NO₃ (ppm) a la siembra, MO% a la siembra, S-SO₄ (ppm) a la siembra, K (meq/100g), PMN y precipitaciones totales (figura 7).



*LogWorth significa $-\log_{10}$ de p valor, para $p\ 0.05 = 1,3$. Valores mayores indican que la significancia es superior al 5% por lo que se realiza otro agrupamiento en el nivel inferior.

Figura No. 7. Árbol de clasificación y regresión para las variables asociadas con la variación del rendimiento en grano

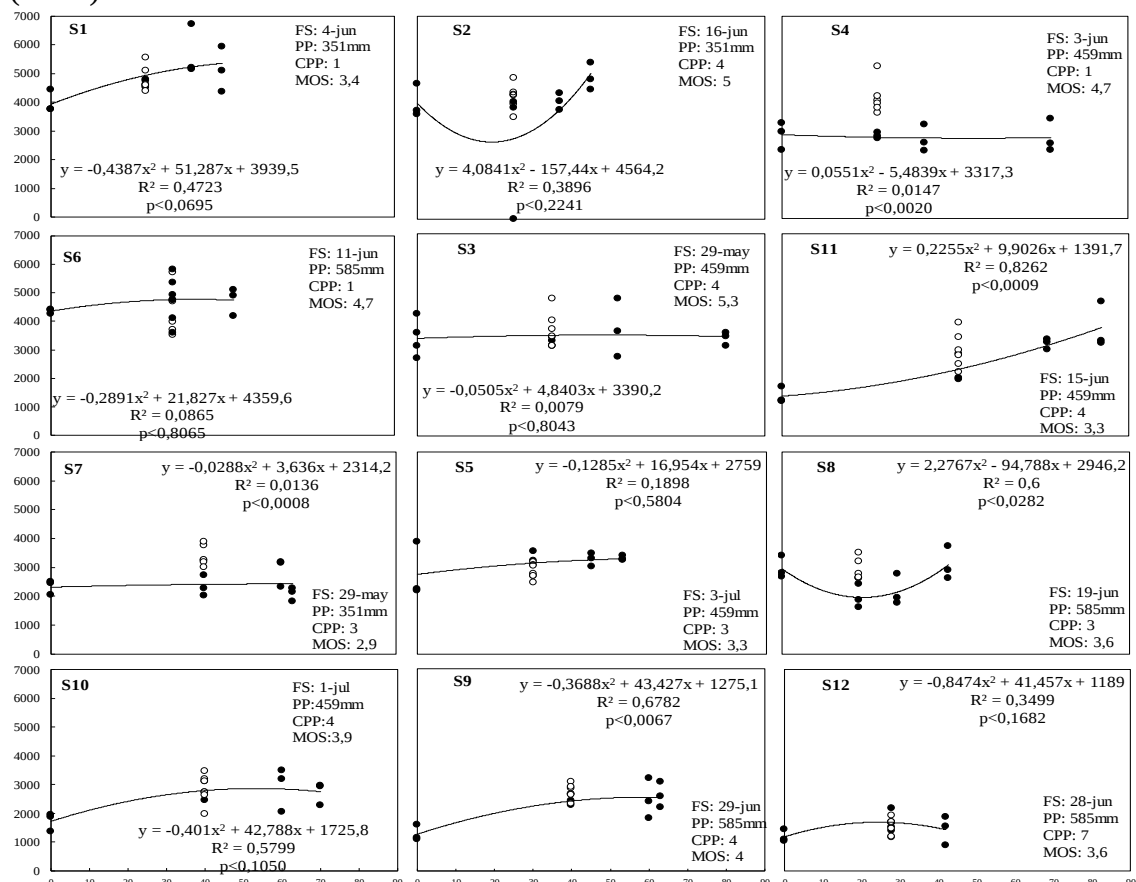
La variable con mayor incidencia en la determinación del rendimiento obtenido resultó ser la fecha de siembra, explicando un 35% del mismo. La fecha de siembra del 19 de junio dividió a los resultados en 2 grupos, donde las fechas posteriores al 19 de junio determinaron una disminución del rendimiento de un 33% con respecto al grupo con fechas previas a dicha fecha.

Para el grupo sembrado tardíamente se particiona en dos nuevos subgrupos de precipitaciones totales en S+O+N. Precipitaciones menores a 585 mm implicaron un rendimiento 31% superior. En tanto para el grupo de fechas de siembra tempranas la partición se da por el contenido de MO del suelo, y muestra que con contenidos de MO mayores a 3,1% el rendimiento fue 45% superior al subgrupo de contenidos de MO menor a 3,1%. Con estas tres variables antes mencionadas se explicó el 64% de la variación de rendimiento, que implicó casi 2400 kg de gran ha⁻¹, entre grupos extremos.

4.1.1. Respuesta al agregado de nitrógeno

La dinámica de N determina que cada ajuste deba realizarse en varios momentos a lo largo del ciclo del cultivo, considerando que la disponibilidad de este nutriente para los cultivos de invierno es una de las variables de manejo que más incide en la concreción del rendimiento en grano (Baethgen 1992, Hoffman et al. 1999, Perdomo et al. 1999). La respuesta al N puede estar limitada por la deficiencia de otros nutrientes. En este sentido se estudiará la respuesta al S.

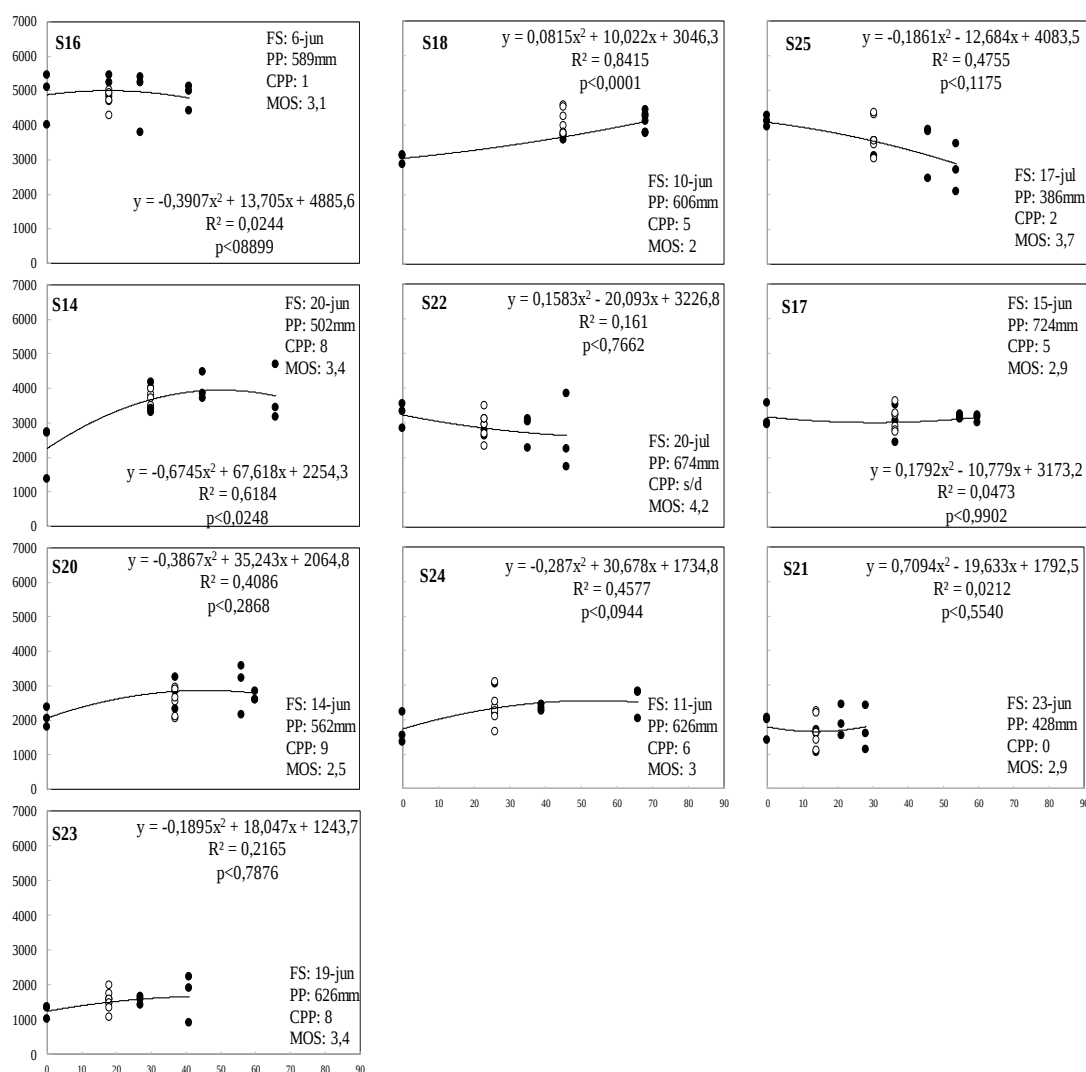
En las siguientes figuras se presentan la respuesta al N a Z22 para los sitios ubicados al Norte y Sur del litoral del país. Los sitios se encuentran ordenados de acuerdo al potencial y por región. Para cada sitio se presenta además la fecha de siembra (FS), precipitaciones (PP), cultivos pos pasturas (CPP) y materia orgánica del suelo (MOS).



○ Corresponden a los tratamientos con S. ● Corresponden a los tratamientos con N

La línea de tendencia corresponde solamente a los tratamientos con nitrógeno, no siendo considerados los tratamientos con azufre.

Figura 8. Rendimiento de los sitios para cada tratamiento de la zona Norte, ordenados según rendimiento potencial



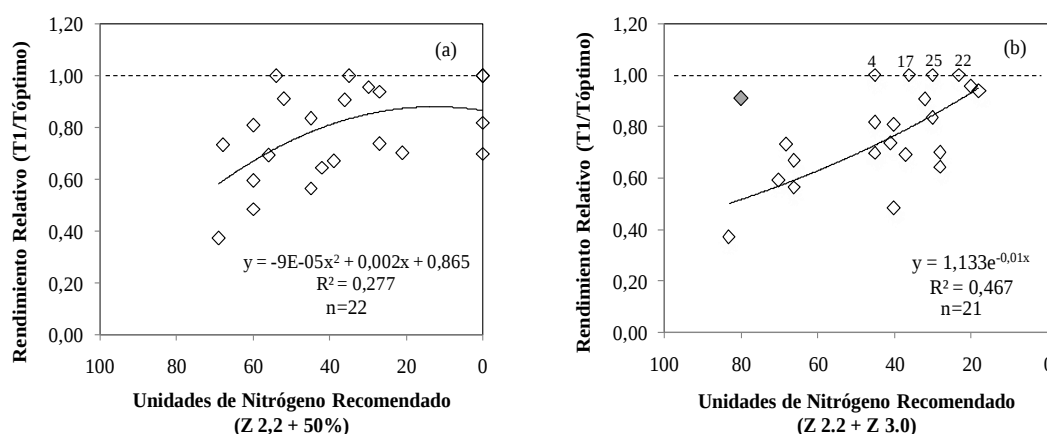
○ Corresponden a los tratamientos con S. ● Corresponde a los tratamientos con N
La línea de tendencia corresponde solamente a los tratamientos con nitrógeno, no siendo considerados los tratamientos con azufre.

Figura 9. Rendimiento de los sitios para cada tratamiento de la zona Sur, ordenados según rendimiento potencial

El rendimiento medio máximo fue mayor en la zona Norte respecto a la zona Sur, siendo las medias de rendimiento 3875 kg.ha^{-1} y 3355 kg.ha^{-1} respectivamente, alcanzando la zona Norte un rendimiento 13% superior. De los cinco sitios en los que se encontró respuesta al agregado de azufre y que serán analizados en un capítulo aparte (S4, S7, S8, S11 y S18), el 80% se encuentra ubicado en la zona Norte.

En varios sitios experimentales las respuestas encontradas fueron muy variables y con un comportamiento no esperable, siendo inconsistente con los niveles de N en suelo. En algunos sitios con bajos niveles de N en suelo donde se esperaba alta respuesta a este nutriente, éste no se observó. El análisis de si la deficiencia de S es la responsable, será discutida posteriormente.

En la figura 10 se presenta la respuesta al agregado de nitrógeno de cada sitio. En los mismos se incluyen los sitios con deficiencias de S, mencionados previamente, y se analiza el tratamiento de agregado en Z 2.2 + 50% y el tratamiento Z 2.2 + Z 3.0.



◆ Corresponde al sitio 3 que fue omitido para la regresión en (b)

Figura 10. Rendimiento relativo según unidades de N recomendado Z 2.2 + 50% (a), y rendimiento relativo según unidades de N recomendado Z 2.2 + Z 3.0 (b)

En la figura 10 (a), si bien se aprecia una tendencia al aumento del rendimiento relativo al disminuir la recomendación de N, en general el ajuste es poco preciso. Y en la figura 10 (b) se aprecia un mejor ajuste entre el N recomendado por el modelo y la respuesta al nitrógeno. Cuando la necesidad estimada de N es menor, es donde el modelo presentó menor capacidad de predicción de la dosis óptima total de N en pos emergencia. En el caso de ajuste a Z 2.2 y Z 3.0 por el modelo propuesto por Baetghen (1992), Perdomo et al. (1999), Hoffman et al. (2001) para Z2.2 y Z3.0 respectivamente, se omitió el sitio 3 para el análisis de la regresión dado que presentó un rendimiento relativo cercano a 1 con 80 UN. En este sitio las abundantes precipitaciones del mes de noviembre podrían explicar este comportamiento, dada la reducción del rendimiento en grano y vuelco del cultivo (3390 kg. ha⁻¹ y 3723 kg ha⁻¹ testigo y tratamiento óptimo respectivamente).

Los sitios sin respuesta al agregado de N son los sitios: 4, 17, 22 y 25 que se encuentran ubicados sobre la línea punteada del gráfico 10 (b), los niveles de N-NO₃ en suelo en Z 2.2 para estos cuatro sitios van de 17 ppm a 19 ppm, valores que están por

encima del nivel crítico validando el modelo planteado anteriormente. En cuanto a los sitios 22 y 25 éstos fueron sembrados en una fecha tardía (20 y 17 de julio respectivamente), y además el sitio 22 presentó un exceso hídrico ya que se registraron 674 mm en el trimestre S+O+N. Igual que el sitio 17 con 724 mm en el mismo trimestre. El sitio 4 no presentó respuesta al agregado de nitrógeno, pero como se verá más adelante hubo otra limitante asociada a la deficiencia de azufre.

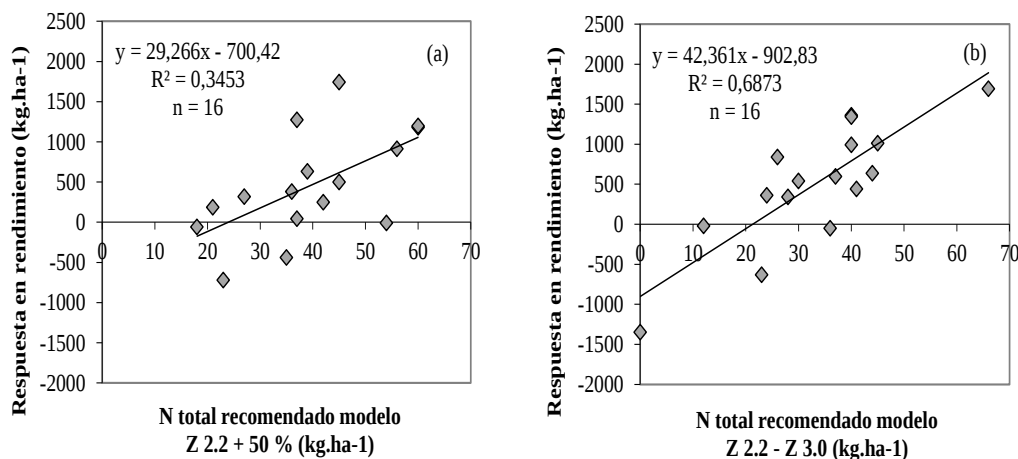


Figura 11. Respuesta al agregado de N total en pos-emergencia en base a recomendación de modelo a Z 2.2 + 50% de la dosis (a), y N total agregado en pos-emergencia en base a recomendación de modelo en Z 2.2 + Z 3.0 (b)

Como resultado general de no utilizar el muestro a Z 22 y Z 30, y optar por decidir la dosis de N en base al muestreo a Z 22 y sumar un 50% adicional a la dosis recomendada, implicó un bajo ajuste en la dosis total de N y la respuesta en rendimiento en grano ($R^2 = 0.34$). En contraste la respuesta en rendimiento a la dosis recomendada en base al ajuste objetivo a Z 22 y Z 30, alcanzo niveles más que satisfactorios a pesar de las condiciones experimentales, antes analizadas ($R^2 = 0.69$).

En el caso del ajuste del N en pos emergencia como es sugerida por la propuesta de análisis nutricional y recomendación de dosis para Uruguay, la EUN fue muy elevada (42 kg de grano kg de N^{-1}), un 45 % superior a la otra opción evaluada (figura 11).

4.2. RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN AZUFRADA

Dada la variabilidad de situaciones presentes en este experimento y considerando que se trata de una red experimental que combina tipos de suelo, antecesores y elevado número de cultivos pos-pastura, a pesar de la importante variabilidad en las precipitaciones, era esperable encontrar respuesta al agregado de S, en base a la combinación antes mencionada por Vilche et al. (2002).

Si bien éste es un nutriente que presenta similar dinámica a la del N, no se dispone en el mundo de indicadores de diagnóstico que permitan ubicar a distintas chacras en cuanto a la respuesta probable al S, y por tanto solo se podía a priori intuir en cuales ambientes podría la deficiencia de S estar afectando la eficiencia del resto de los recursos de producción.

En la siguiente figura se presentan las cantidades de S y N aplicadas en cada sitio experimental, ordenadas según la dosis de S aplicada a Z 2.2. La dosis de N corresponde al tratamiento con agregado de N en Z 2.2+Z30.

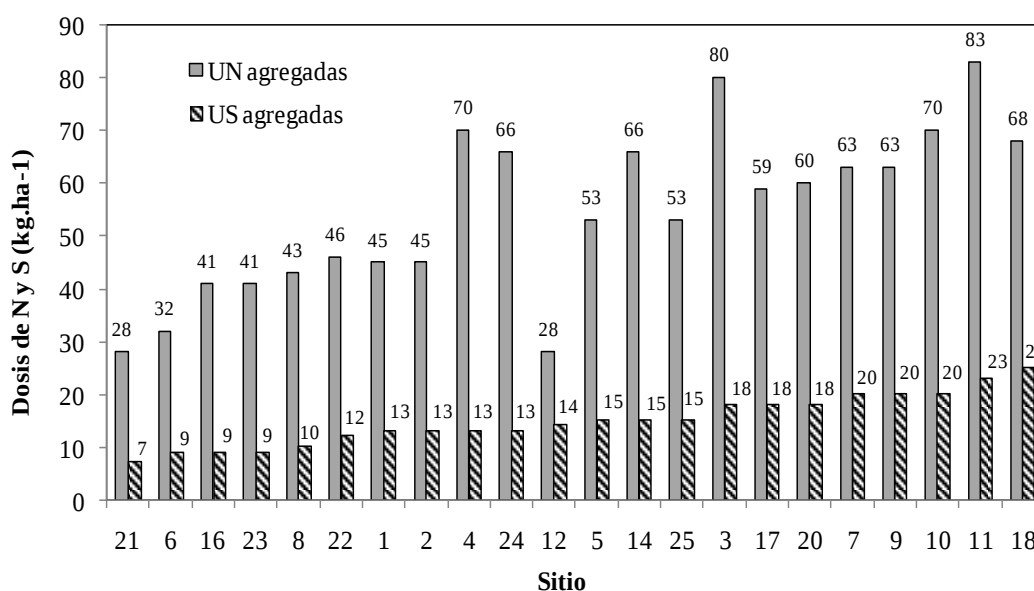


Figura 12. Dosis de S agregado en Z 2.2 y N agregado en Z 2.2 y Z 3.0 para cada sitio (ordenadas según dosis de S)

La variación existente en la dosis de N aplicada en cada uno de los sitios, surge de la corrección por N en Z 2.2 en base a la concentración de N-NO₃ en suelo y el modelo de Baethgen (1992) a Z 3.0. La dosis de S surge de la cantidad de fertilizante utilizado para el ajuste del N y del contenido de S de la fórmula utilizada. Finalmente, la variación en N aplicado para una misma dosis de S está explicada por las diferentes dosis de N en cada fuente de S aplicada.

Para analizar si existió respuesta al S, se contrastaron los tratamientos con N + S y el tratamiento con N solamente en Z 2.2. Para esto se establecieron tres contrastes, uno entre el tratamiento con N en Z 2.2 (T2) y el tratamiento con N + S como “Entec 26” (T5), otro entre el T2 y el tratamiento con N + S como sulfato de amonio (T6) y por último entre el T2 y el promedio de T5 y T6. Los primeros dos contrastes permiten evaluar el efecto fuente de S y el tercero permite estudiar la respuesta al S en promedio.

Cuadro 3. Rendimiento de los tratamientos con N y N+S en Z 2.2 y los contrastes estadísticos ordenados según la banda de potencial

Bandas de rendimiento	Sitio	T2	T5	T6	Promedio T5 y T6	Contraste T2 con T5 (*)	Contraste T2 con T6 (*)	Contraste T2 con T5 y T6 (*)
Banda 4	1	4680	4840	4772	4806	0,7660ns	0,8639ns	0,7866ns
	2	4504	5002	4640	4821	0,2600ns	0,7497ns	0,4002ns
	16	5166	4878	4627	4752	0,5176ns	0,2386ns	0,2923ns
	4	3285	4404	5140	4772	0,0077	0,0003	0,0005
	6	4805	4088	4717	4402	0,1403ns	0,8486ns	0,3238ns
	18	3662	4441	3836	4139	0,0010	0,3318ns	0,0091
	25	3408	3894	3498	3696	0,2430ns	0,8226ns	0,4156ns
	14	3608	3770	3694	3732	0,5966ns	0,7787ns	0,6400ns
	3	3432	3445	3976	3711	0,9740ns	0,1974ns	0,4332ns
	11	2289	3390	2566	2978	0,0274	0,5318ns	0,0919
Banda 3	7	2327	3594	3156	3375	0,0009	0,0128	0,0013
	5	3154	2768	2967	2867	0,3775ns	0,6649ns	0,4474ns
	22	2789	2789	3088	2939	>0,999ns	0,4792ns	0,6803ns
	17	3000	3088	3088	3088	0,7285ns	0,7285ns	0,6889ns
	8	1959	2669	3101	2885	0,0774	0,0100	0,0142
	20	2798	2544	2509	2526	0,4430ns	0,3848ns	0,3475ns
	10	2765	2974	2721	2848	0,6528ns	0,9239ns	0,8370ns
	9	2438	2717	2743	2730	0,4019ns	0,3611ns	0,3150ns
Banda 2	24	2502	2621	2025	2323	0,7066ns	0,1524ns	0,5175ns
	21	1588	1578	1794	1686	0,9767ns	0,5437ns	0,7368ns
	12	1841	1695	1347	1521	0,5015ns	0,0398	0,1077ns
	23	1544	1518	1535	1526	0,9207ns	0,9735ns	0,9389ns
Promedio de rendimientos		3070	3305	3252	3278			

T 2 = Fertilizado Z 2.2 según modelo Facultad de Agronomía (solamente N fuente urea).

T 5 = Fertilizado Z 2.2 con N y S (fuente "Entec 26").

T 6 = Fertilizado Z 2.2 con N y S (fuente urea + sulfato de amonio).

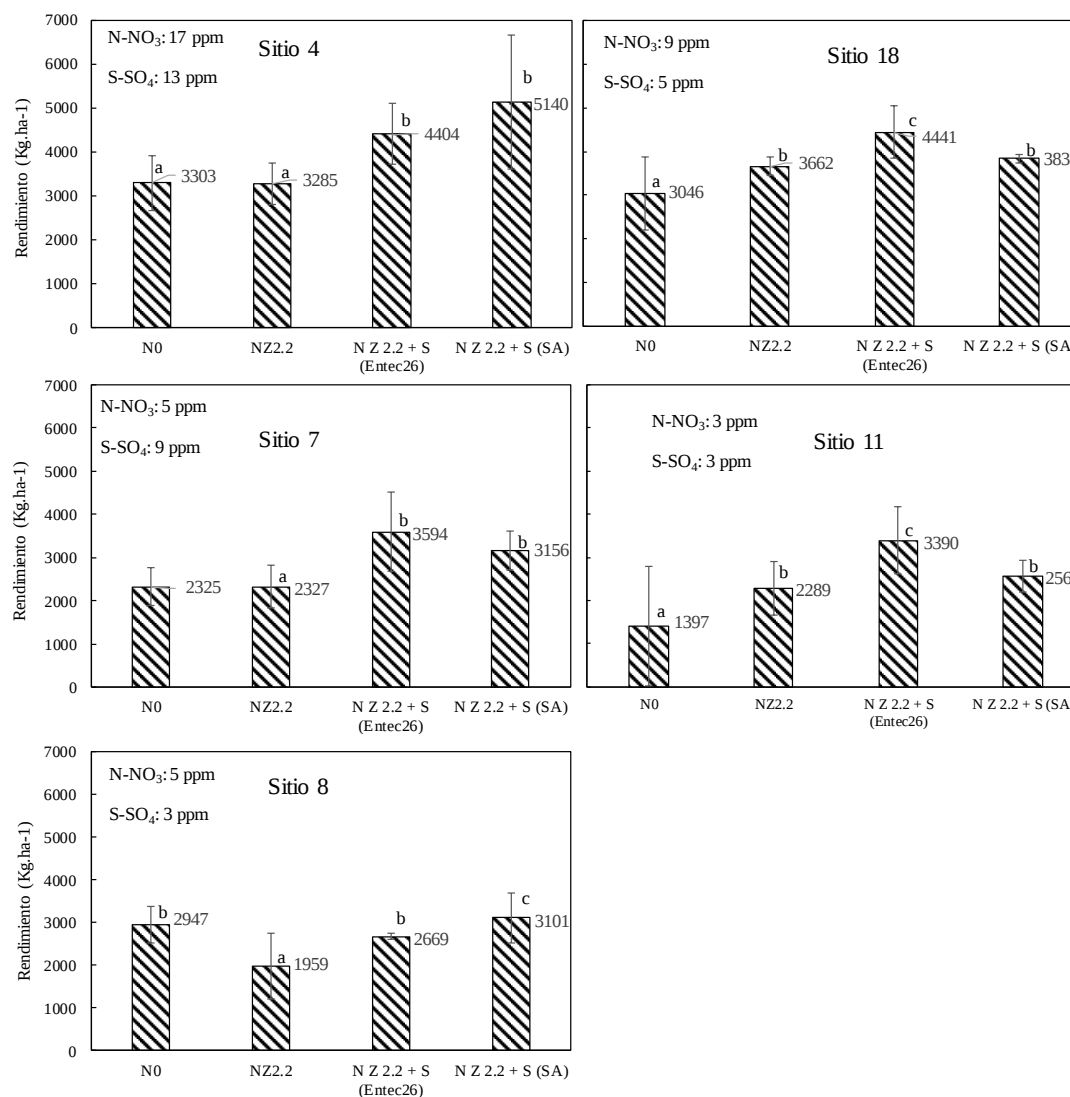
(*) P<0.10

Fuente: Baethgen (1992).

En el cuadro 3 se observa que solamente hubo respuesta a la fertilización azufrada en 5 sitios de los 22 lo que corresponde al 28% de los sitios. El 80% de los sitios con respuesta se ubicó en la banda de mayor potencial (banda 4), lo que sugiere que aquellas situaciones de mayor potencial son las que primero manifiestan las deficiencias. La respuesta a azufre en Z2.2 se observa en los sitios donde el contenido de N fue bajo, pero el sólo agregado de N no incrementó los rendimientos como cuando fue

aplicado conjuntamente con el S. Estos resultados coinciden con lo reportado por Castellarín et al. (2009).

En los siguientes gráficos se presenta el comportamiento de los cinco sitios con respuesta significativa a la fertilización azufrada. Los mismos se encuentran ordenados según rendimiento máximo logrado en el mejor tratamiento con agregado de azufre.



* Valores con distinta letra entre columnas difieren entre si significativamente (Fisher $P < 0.05$).

Figura 13. Rendimiento en grano de los sitios con respuesta al azufre para el tratamiento testigo, el tratamiento con N en Z 2.2 y para los dos tratamientos con N + S en Z 2.2 SA(sulfato de amonio)

Cuadro 4. Resumen de los sitios con respuesta al agregado de azufre a Z 2.2

Sitios con respuesta a S (*)	UN agregado en Z 2.2	US agregadas en Z 2.2	Rend. T1 (kg. ha. ⁻¹)	Rend. T2 (kg. ha. ⁻¹)	Rend. mejor tratamiento con S (kg. ha. ⁻¹)	Respuesta del mejor tratamiento (kg. ha. ⁻¹)	EUS (kg. ha. - ¹)
4	25	13	3303	3285	5140	1855	143
7	40	20	2325	2327	3594	1268	63
8	20	10	2947	1959	3101	1143	114
11	46	23	1397	2289	3390	1101	48
18	45	25	3046	3662	4441	779	31
Promedio*	35	18	2604	2704	3933	1229	80
Promedio **	42	14	2790	3178	3302	124	8

*Sitios con respuesta significativa (nivel de significancia Fisher $P < 0.10$). ** Sitos sin respuesta a S.

Se ve una respuesta muy importante al agregado de azufre, que en promedio fue de 1229 kg ha⁻¹ y una EUS muy elevada, aunque muy variable (cuadro 4). En los sitios con respuesta, los niveles de S agregados variaron entre 10 y 25 US, en tanto para el caso del N el rango de dosis fue de 20 a 46 UN. Si bien se presentó respuesta diferencial según la fuente de S, no se encontró una explicación directamente asociada a las diferencias esperables entre ellas en base a sus características diferenciales.

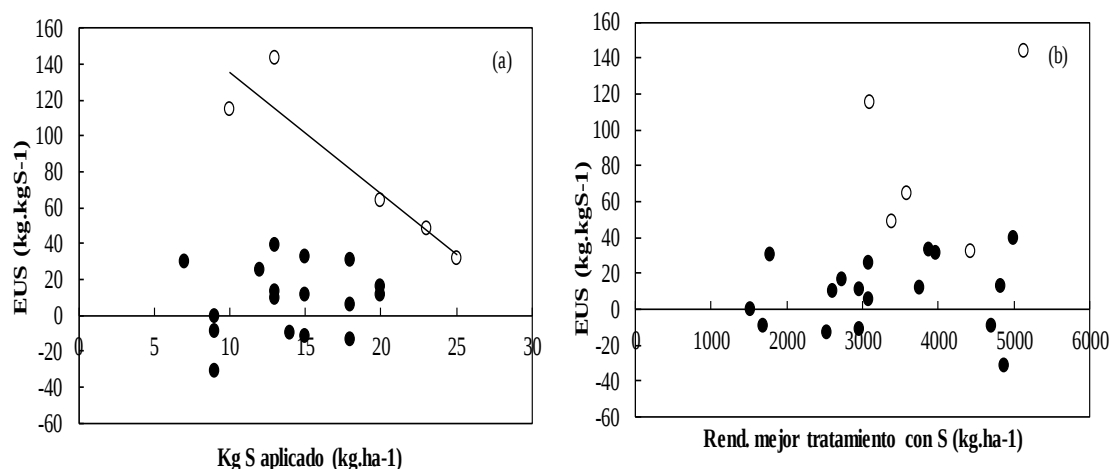
Para los sitios 4 y 7 se observó una clara respuesta al agregado de S, a pesar de no haber diferencias significativas entre fuentes. Para el sitio 4 con un aparente mejor comportamiento del sulfato de amonio respecto al “Entec 26” que representa 736 kg (17% superior). En cuanto al S, contrariamente a lo citado en la bibliografía respecto a la ausencia de respuesta a este por encima de las 10 ppm (García Lamothe 2002, Morón 2005, García Lamothe y Quincke 2011), para este sitio hubo respuesta con un valor de S-SO₄ en suelo de 13 ppm. En el sitio 7 el agregado únicamente de N, a pesar del bajo nivel de N-NO₃ en suelo, no genera respuesta ya que la deficiencia de S no permite que éste sea utilizado por parte del cultivo. Se observa respuesta al S con una leve tendencia a un mejor comportamiento del “Entec 26”, a pesar de no presentar diferencia significativa con el sulfato de amonio

Los sitios 18 y 11 a pesar de presentar potenciales muy contrastantes tienen un comportamiento frente a los nutrientes muy similar. Los niveles tanto de N como de S en suelo a pesar de ser bajos para ambos sitios, resultan más elevados para el sitio 18 y así lo refleja el mejor rendimiento del tratamiento testigo. Para ambos sitios el “Entec 26” mostró un mejor resultado (cuadro 4).

Respecto al sitio 8, se estaría frente a una situación de deficiencia inducida por lo que la respuesta al N está condicionada a la presencia de S. Cordone y Martínez (2000) lo explican como un estrés adicional a la planta provocado por el agregado de N

que genera una caída del rendimiento cuando el S es limitante. Teniendo en cuenta el bajo valor de N-NO_3 de 5 ppm era esperable una clara respuesta al N, pero que al adicionar N conjuntamente con S se obtiene una respuesta, la cual debido a otras condicionantes del sitio no determinan un mayor rendimiento que el tratamiento testigo.

Otra forma de analizar el comportamiento de este nutriente es relacionarlo con la eficiencia en el uso del mismo (EUS). La EUS se presenta a continuación.



○ mejor rendimiento con azufre, corresponden a los sitios con respuesta significativa al S. ● sitios sin respuesta significativa

Figura 14. Eficiencia de uso del azufre (EUS) en función de los kg. de azufre aplicados (a), y (b) eficiencia de uso de azufre en función del potencial del sitio experimental

De la figura 14, se desprende que la EUS se relacionó con la dosis de S y no es clara la relación con el rendimiento potencial, aunque se puede observar es que las mayores EUS se alcanzan cuando el rendimiento en grano supera los 3000kg ha^{-1} .

4.2.1. Respuesta al agregado de azufre a Z 2.2 y su relación con indicadores nutricionales de diagnóstico

En el siguiente cuadro se presenta para todos los sitios los indicadores de suelo y planta utilizados para describirlos.

Cuadro 5. Caracterización de los nutrientes en suelo (S y N) y status nutricional a Z 3.0 para los diferentes sitios (ordenado según EUS)

Sitio	No. de cultivos	N-NO ₃ 0-20cm. Z 2.2 (ppm.)	MOS (%)	S-SO ₄ 0-20cm Z 2.2 (ppm.)	N planta Z 3.0 (%)	S planta Z 3.0 (%)	EUS (kg.kg.S-1)
4(*)	1	17	4,7	13	2,8	0,5	143
8(*)	3	5	3,6	3	3,5	0,5	114
7(*)	3	5	2,9	9	4	0,3	63
11(*)	4	3	3,3	3	2,5	1,2	48
2	4	3	5	2	2,6	1,4	38
25	2	19	3,7	8	3,3	0,8	32
18(*)	5	9	2	5	3,2	0,6	31
3	4	8	5,3	23	3,4	0,5	30
21	0	17	2,9	5	2,7	0,6	29
22	-	-	4,2	5	3,7	1,9	25
9	4	5	4	12	3,7	0,3	15
1	1	16	3,4	8	3,1	1,4	12
14	8	-	3,4	5	3	0,6	11
10	4	8	3,9	8	3,2	0,5	10
24	6	17	3	3	2,8	0,8	9
17	5	-	2,9	5	-	-	5
23	8	12	3,4	2	3,5	1,2	-1
6	1	9	4,7	5	-	-	-10
12	7	7	3,6	7	-	-	-10
5	3	22	3,3	3	3,8	0,8	-12
20	9	2,1	2,5	3	2,8	0,8	-14
16	1	13	3,1	12	3,6	0,3	-32

(*) Se resaltan los sitios con respuesta significativa a fertilización azufrada.

Desde el punto de vista nutricional en cuanto al azufre, no se encontró relación entre las variables del cuadro 5, y la respuesta significativa al agregado de S, ni con la EUS. Coincidiendo con la bibliografía (García Lamothe 2002, Morón 2005, García Lamothe y Quincke 2011), en cuanto a que las variables anteriores no siempre tienen relación consistente con la respuesta a la fertilización azufrada (Boga, 2014).

Según la bibliografía los indicadores más utilizados para intentar diagnosticar las deficiencias azufradas han sido: contenido de S en suelo y planta, y la relación N/S en planta y en suelo (Schung y Haneklaus 1998, Blake-Kalff et al. 2002).

A continuación, se presentan para todos los sitios, los valores de S-SO₄ en suelo y los niveles de S en planta, solamente para el tratamiento con N a Z 2.2.

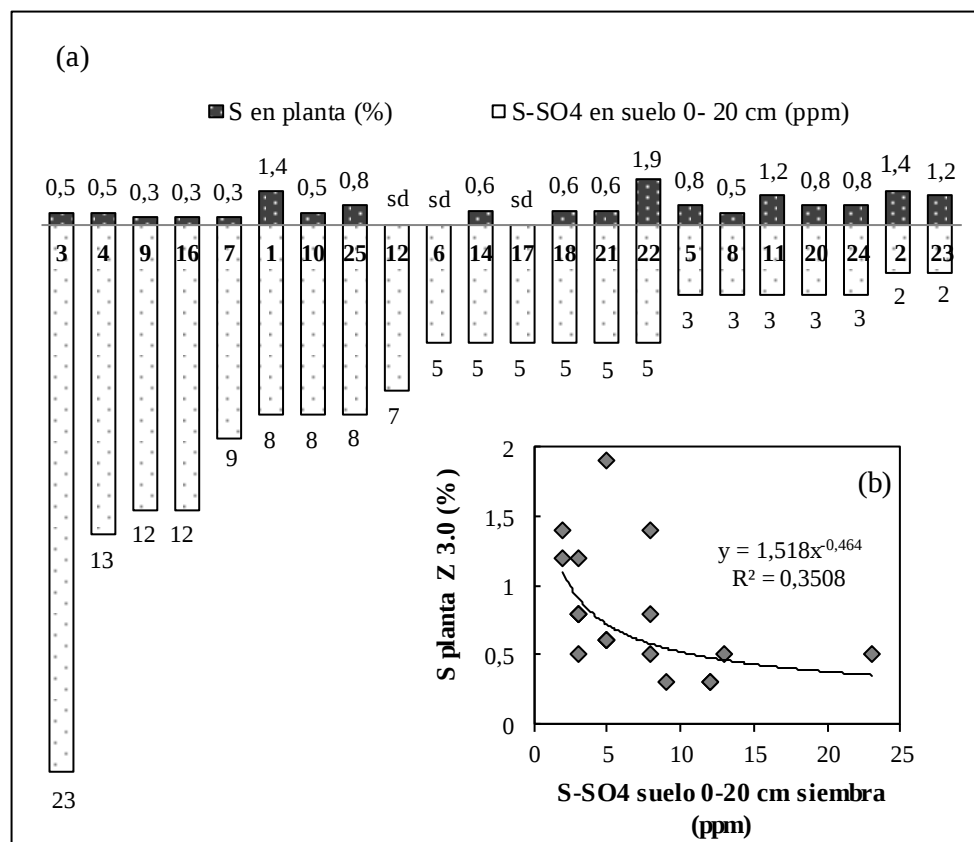


Figura 15. Relación entre nivel de azufre en suelo a siembra 0 – 20 cm (S-SO₄ ppm) y nivel en planta en Z 3.0 (%) para el T2 (planta con agregado de S a Z 2.2)

La figura 15 muestra que existió relación potencial negativa entre los niveles de S-SO₄ en suelo a siembra y los niveles de S en planta en Z 3.0. Con los niveles de S-SO₄ en suelo mayores a 10 ppm, los niveles de S en planta fueron bajos (entre 0,3 y 0,5 % en planta), en tanto los mayores niveles en planta (mayores a 1%) se registraron con bajos niveles de S-SO₄ en suelo entre 5 y 8 ppm. Contrariamente a lo encontrado por algunos autores (García Lamothe 2002, Morón 2005, García Lamothe y Quincke 2011) en este experimento se encontraron varios sitios con niveles elevados de azufre en suelo (con más de 10 ppm S-SO₄), encontrándose en alguno de estos sitios respuesta a la fertilización azufrada pese a dichos valores. El azufre en planta en concordancia con lo citado en la bibliografía (Spencer y Freney 1980, Scaife y Burns 1986, Pinkerton 1998), no presentó un comportamiento predecible.

Respecto al S en planta, si bien no es posible establecer un criterio para definir si un nivel de S en planta es alto o bajo dado que no se encontraron valores en la bibliografía, se puede observar en la figura 15, que a niveles de S más elevados en suelo hay menos S en planta. Esto podría ser interpretado como asociado a un mayor consumo por parte de la misma lo que llevaría a una dilución del nutriente en planta.

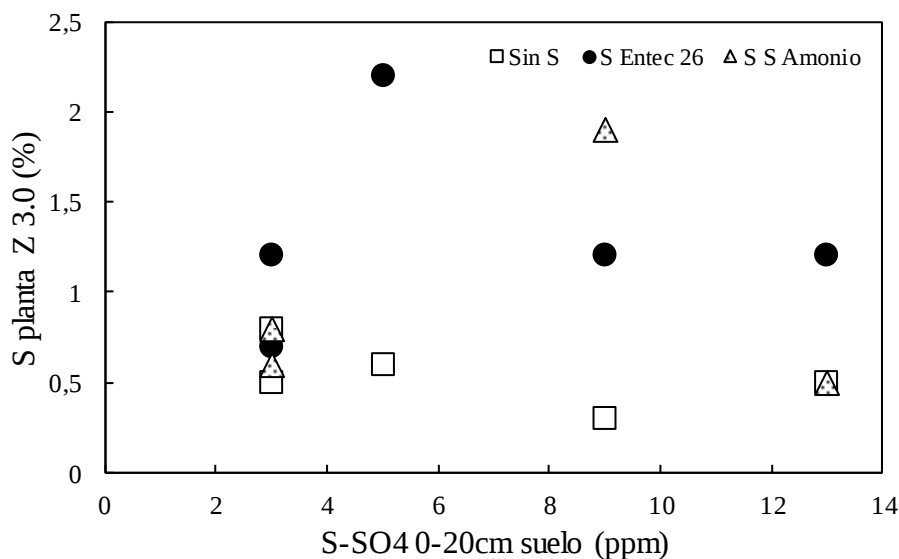


Figura 16. Contenido de S en planta en Z 3.0 para aquellos sitios con respuesta a la fertilización azufrada para las dos fuentes utilizadas y el tratamiento testigo

Solo para los sitios con respuesta, los niveles de S en planta fueron independientes de los niveles de S en suelo. A su vez, cuando se realizaron aplicaciones de S siempre aumentó el nivel de S en planta, pero la fuente más efectiva fue el “Entec 26”, con un promedio de S en planta de 1.3 para el “Entec 26” y 0.95 para el sulfato de amonio. Contrariamente a lo esperado en alguno de los sitios, la fuente que hizo que aumentara más la concentración de S en planta no fue la que hizo aumentar en mayor medida el rendimiento en grano, por lo tanto, el indicador de S en planta nuevamente no parece ser un indicador que permita predecir o explicar la respuesta al agregado de este nutriente por sí solo.

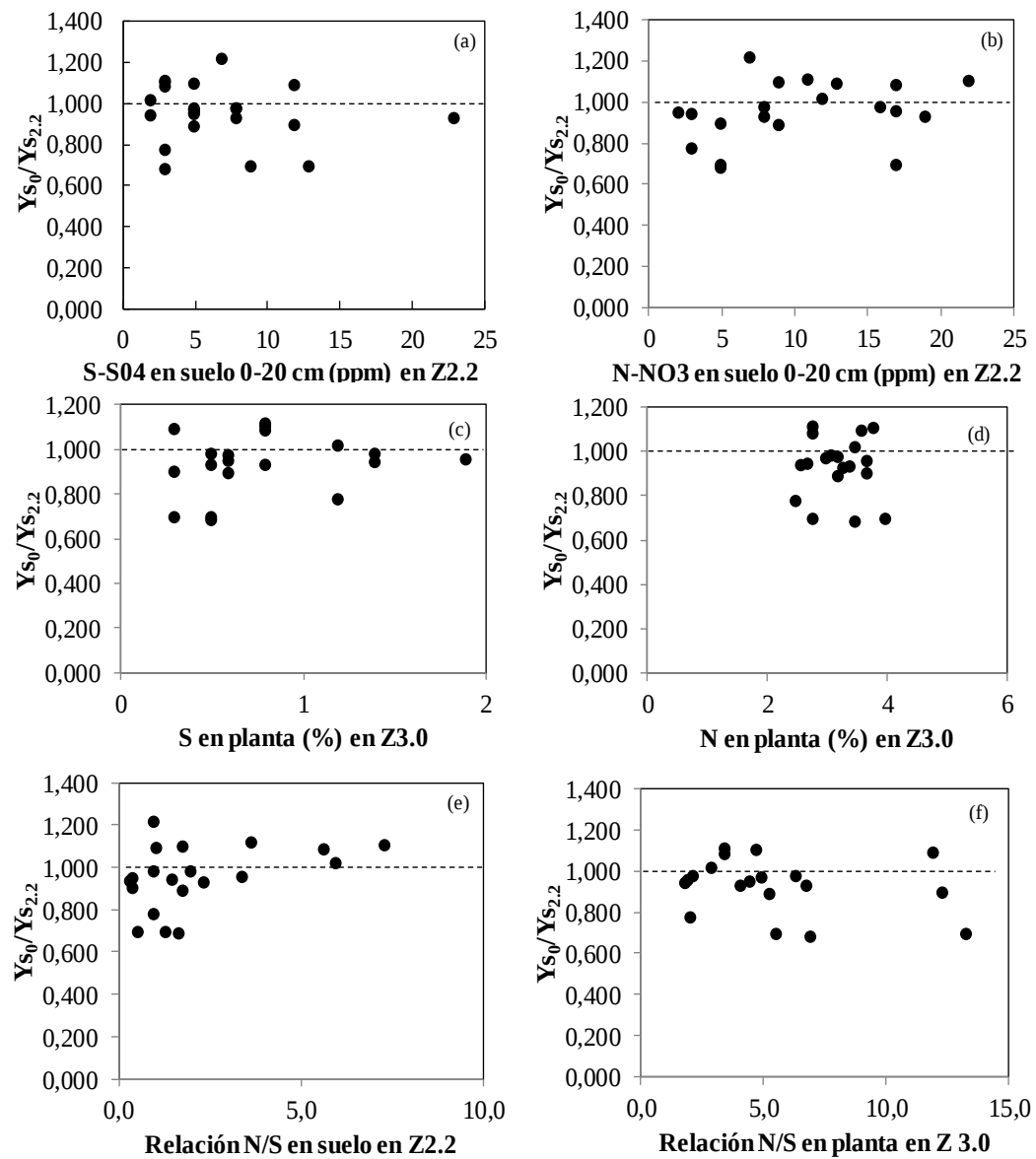


Figura 17. Respuesta al rendimiento en función de distintos indicadores en suelo y planta

Cuadro 6. Resumen del análisis estadístico de los distintos indicadores

	N-NO3 Z22	S-SO4 Z22	S planta Z30	N planta Z30	Rel N/S suelo Z	Rel N/S planta Z30
R2=	0,1764	0,0427	0,1496	0,0000	0,1686	0,2841
P valor	0,33	0,84	0,46	0,99	0,36	0,14
Niv. crítico	9,0485	13,0002	0,8000	2,4558	5,0179	1,9945
a=	0,76	1,00	0,75	3,03	0,87	0,85
b=	0,0257	-0,0082	0,2675	-0,8567	0,0392	0,1155
Pateau=	0,9907	0,8929	0,9654	0,9248	1,0628	1,0770

Se analizaron indicadores para dos momentos del estadio del cultivo, a Z2.2 los indicadores de suelo y para el caso de Z3.0, los indicadores en planta.

Ninguno de los indicadores presentados mostró poder predecir el comportamiento a la fertilización azufrada y menos aún poder estimar la necesidad de realizar dicha corrección, lo cual es consistente con la bibliografía citada anteriormente. La relación en suelo N/S parecería ser el indicador más promisorio en poder predecir la respuesta a la fertilización azufrada. Contrariamente a lo encontrado en la bibliografía acerca de la utilidad de la relación N/S en grano y en biomasa aérea (Randall et al. 1981, Withers et al. 1995, Reussi Calvo et al. 2008, 2011), en este experimento el estimador del estatus azufrado que presentó el mejor comportamiento, aunque igualmente poco satisfactorio, resultó ser la relación N/S en suelo (Z2.2).

Dado que no se encontró ningún indicador robusto en cuanto a predecir la respuesta a la fertilización azufrada, se estudiaron otros dos posibles estimadores de respuesta como el potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) y el contenido de materia orgánica en suelo. El PMN por encontrarse muy relacionada la mineralización de N con la del S (Echeverría et al., 1996) y el contenido de MO por haber encontrado una fuerte relación entre éste y el rendimiento para las fechas de siembra tempranas.

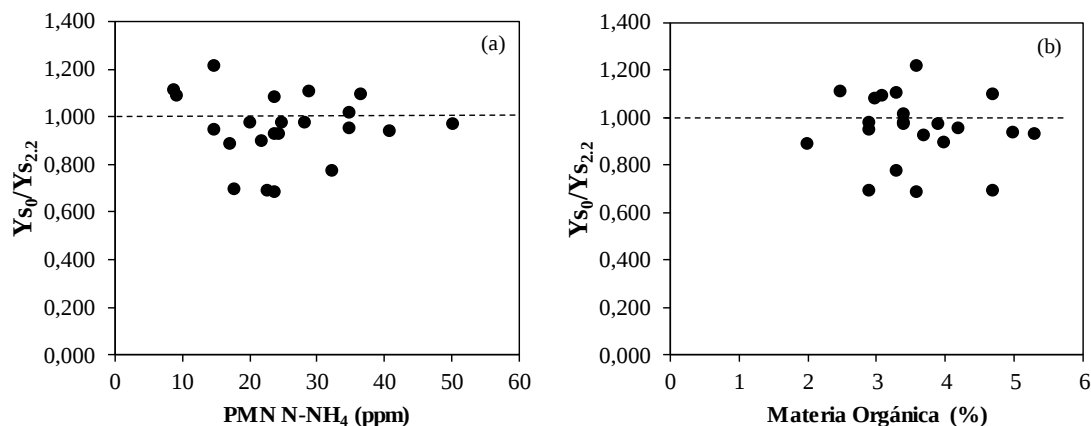


Figura 18. Relación entre el rendimiento relativo de los tratamientos con azufre y el PMN (a), y relación entre rendimiento relativo de los tratamientos con S y el contenido de MO (b)

Se observa una gran variabilidad en los parámetros analizados tanto para PMN como para contenido de MO, con valores muy bajos hasta valores elevados de ambas variables. A pesar de ello no se encontró relación entre los mismos y la respuesta al agregado de S.

De todos los indicadores con los que se trabajó, se puede concluir que solamente uno de ellos mostró resultados que podrían estar indicando una tendencia en la capacidad de predecir la respuesta a la fertilización azufrada. Este indicador es la relación N/S en suelo de 0-20 cm en el estadio Z2.2, con valores menores a 2,5 parecería haber respuesta a la fertilización, en tanto que con valores mayores no existió respuesta al agregado de S.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, el 28% de los sitios presentó respuesta a la fertilización azufrada, siendo en promedio la EUS de 80 kg grano kg de S agregado⁻¹, y una respuesta de 1229 kg de grano ha⁻¹. Por lo tanto se acepta la primera hipótesis de este trabajo.

La respuesta al S varió con la fuente azufrada, sin que ninguna de ellas fuera la mejor en todos los sitios con respuesta significativa. No pudo ser explicada la causa de la superioridad de una fuente u otra en cada situación, por lo que se acepta también la segunda hipótesis del trabajo.

Se evaluaron los siguientes indicadores como posibles predictores de la respuesta al S: N y S en suelo a Z2.2, N y S en planta a Z 3.0 y la relación N/S en suelo a Z 2.2 y relación N/S en planta a Z 3.0, PMN y MOS de cada sitio. Ninguno de estos indicadores, resultó en una opción precisa para estimar la respuesta observada al agregado de S, se rechaza por lo tanto la tercera hipótesis del presente trabajo.

Las variables más fuertemente relacionadas con la variabilidad del rendimiento en grano, en orden de importancia fueron: 1) fecha de siembra, en donde el 19 de junio separó a dos grupos de rendimientos que se diferenciaron en 1331 kg ha⁻¹; 2) para el grupo de mayor rendimiento, la MOS % superior al 3.1%, implicó un aumento en rendimiento de 1510 kg ha⁻¹, conformando el grupo de mayor potencial, en los cuales se ubican los experimentos de 5 toneladas; 3) para el grupo de menor potencial, asociados a las siembras más tardías, el exceso de precipitaciones (> 585 mm en S+O+N), separó al grupo de menor potencial (2520 kg ha⁻¹).

En cuanto al N, si bien no era el objetivo central del presente trabajo, se pudo validar que el modelo de fertilización nitrogenada de Facultad de Agronomía sigue siendo la forma más precisa de ajustar la fertilización nitrogenada en los cultivos de invierno en Uruguay en pos-emergencia, con una muy elevada EUN (43 kg de grano kg de N agregado⁻¹), superior a la obtenida con el manejo alternativo, de fertilizar en Z2.2 +50%. Los errores de ajuste del N surgen de las chacras se concentraron en aquellas situaciones con deficiencia de S.

6. RESUMEN

El esquema agrícola actual con ausencia de rotación con pasturas, sumado a la alta proporción de soja y la ausencia de S residual en los fertilizantes utilizados, determinan que cada vez con mayor frecuencia se presenten situaciones en las que las deficiencias de S determinan limitaciones para concretar altos rendimientos. En función de ello el objetivo del presente trabajo es evaluar la respuesta al S y su interacción con la respuesta al N en situaciones de chacra en la zona litoral Oeste del país para el cultivo de cebada y estudiar los indicadores de diagnóstico que posibiliten predecir la respuesta al agregado de este nutriente. Se espera que exista respuesta al agregado de S y que este condicione la respuesta al N, obtener indicadores que permitan predecir la respuesta al S, y conocer la respuesta al S en función de distintas fuentes para las condiciones actuales de producción en Uruguay. Para ello se utiliza la información de una red de experimentos en 22 chacras comerciales de cebada cervecera, llevados adelante por Ingenieros Agrónomos a nivel de producción. Los tratamientos son 6, en 4 se corrige con N y en 2 de ellos se incluyen 2 fuentes de S para evaluar si alguna tiene mejor comportamiento (T1 N0, T2 N en Z2.2, T3 N en Z2.2+50%, T4 N en Z2.2 y Z3.0, T5 N y S (“Entec 26”) en Z2.2, T6 N y S (sulfato de amonio) en Z2.2). El año 2009 se caracteriza por ser desfavorable para el cultivo de cebada cervecera, asociado a un régimen de precipitaciones en los meses de setiembre, octubre y noviembre superior al promedio histórico, y temperaturas particularmente elevadas en el mes de agosto. Las variables más fuertemente relacionadas con la variabilidad del rendimiento en grano, en orden de importancia son: 1) fecha de siembra, en donde el 19 de junio separó a dos grupos de rendimientos que se diferenciaron en 1331 kg ha⁻¹; 2) para el grupo de mayor rendimiento, la MOS % superior al 3.1%, implica un aumento en rendimiento de 1510 kg ha⁻¹, conformando el grupo de mayor potencial, en los cuales se ubican los experimentos de 5 toneladas; 3) para el grupo de menor potencial, asociados a las siembras más tardías, el exceso de precipitaciones (> 585 mm en S+O+N), separa al grupo de menor potencial (2520 kg ha⁻¹). En cuanto a los indicadores no se encuentra ninguno con capacidad clara de predecir la necesidad de aplicación de este nutriente, pero si se encuentra una respuesta errática al agregado del mismo. Por lo que se concluye que la hipótesis 1 se cumple, existe respuesta al agregado de S y esta condiciona la respuesta al N en el 28% de los sitios. La hipótesis 2 no se cumple, ya que no se encuentran indicadores de suelo y planta que permitan predecir la respuesta al agregado de este nutriente. Y la hipótesis 3 se cumple ya que hay respuesta al S dependiendo del tipo de fuente pero la misma no es consistente en todos los sitios con respuesta.

Palabras clave: Cebada; Respuesta a la fertilización azufrada; Indicadores de respuesta al azufre.

7. SUMMARY

The actual agricultural model without pastures rotations, in addition to the high proportion of soybean crops, and the absence of residual S in the fertilizers used, this determines that every time it is more frequent to find situations in which the S limitations it leads to not being able to achieve high yields. Based on this, the objective of this work is to evaluate the S response and interaction with N response in field situations in the west coast of the country for barley crops and study the diagnostic indicators that allow to predict the response to the addition of this nutrient. So it is expected that there is a response to the aggregate of S and that this conditions the response to N, obtain indicators that predict the response to S, and response to S based on different sources for the current conditions of production in Uruguay. For this, the information of a network of experiments is used in 22 commercial barley crops directed by farmers field agronomist. The treatments are 6, in 4 of them is corrected with N and in 2 of them are included 2 sources of S to evaluate if any have better behavior (T1 N0, T2 N in Z2.2, T3 N in Z2.2+50%, T4 N in Z2.2 and Z3.0, T5 N and S (“Entec 26”) in Z2.2, T6 N and S (ammonium sulphate) in Z2.2). The year 2009 is characterized by being unfavorable for brewing barley crops, associated with rainfall in the months September, October and November above the historical average, and particularly high temperatures in the month of August. The variables most strongly related to the variability of grain yield, in order of importance are: 1) sowing date, finding on prior to June 19th. separates two groups of yields that differ by 1331 kg ha⁻¹; 2) for the group with the highest performance, the MOS % higher than 3,1%, implies an increase in yield of 1510 kg ha⁻¹, forming the most potential group, in which the 5 tons experiments are located; 3) for the lowest potential group, associated to late sowing, the rainfall excess (> 585 mm in S+O+N), separates the lowest potential group (2520 kg ha⁻¹). As for the indicators, is not found with a clear capacity to predict to application need of this nutrient, but if an erratic response is found to aggregate of this. So it is concluded that hypothesis 2 is valid, there is a response to the aggregate of S and this conditions the N response in 28% of the sites. Hypothesis 2 is not valid, since is not found soil and plant indicators that predict the response to the addition of this nutrient. Hypothesis 3 is valid because there is a response to the S depending on the type of source but it is not consistent in all sites with response.

Keywords: Barley; Response to sulfur fertilization; Sulfur response indicators.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Alves, M. E.; Lavoretti, A. 2004. Sulfate adsorption and its relationships with properties of representative soils of the Sao Paulo State, Brazil. (en línea). *Geoderma*. 118:89-99. Consultado 23 jul. 2013. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/geoderma>
2. Baethgen, W. 1992. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral Oeste del Uruguay. Montevideo, INIA. 59 p. (Serie Técnica no. 24).
3. Blake-Kalff, M. A.; Harrison, K. R.; Hawkesford, M. J.; Zhao, F. J.; McGrath, S. P. 1998. Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth. *Plant Physiology*. 118:1337-1344.
4. _____.; Zhao, F. J.; McGrath, S. P. 2002. Sulfur deficiency diagnosis using plant tissue analysis. *Proceedings of the International Fertilizer Society*. 503:5-25.
5. Boga, L. 2014. La nutrición de cebada cervecera en Argentina: mejores prácticas de manejo de la fertilización. *Informaciones Agronómicas*. IPNI. no. 14:19-26.
6. Bolton, J.; Nowakowski, T. Z.; Lazarus, W. 1976. Sulphur-nitrogen interaction effects on the yield and composition of protein-N non-protein-N and soluble carbohydrates in perennial ryegrass. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 27:533-560.
7. Brady, N.; Weil, R. 1999. *Nature and properties of soil*. New York, Cornell University. 960 p.
8. Burzaco, J. O.; Ciampitti, I. A.; Garcia, F. O. 2009. Mejores prácticas de manejo para la nutrición del cultivo colza-canola: una revisión. *Archivo Agronómico*. no. 13:1-5.
9. Capurro, J.; Friorito, C.; González, M. C.; Casasola, E.; Zazzarini, A.; Andrioni, J.; Vernizzi, A. 2007. Respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre en el sur de Santa Fe. *IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 36:17-21.
10. Castellarín, J. M.; Pedrol, H. M.; Dignoni, D.; Ferraguti, F.; Salvagiotti, F. 2009. Interacción del nitrógeno con el azufre y sus efectos sobre la producción de biomasa y el rendimiento en diferentes genotipos de trigo. *INTA EEA Oliveros. Para Mejorar la Producción*. no. 40:45-52.

11. Castro, A.; Hoffman, E.; Viega, L. 2011. Limitaciones para la productividad en trigo y cebada. Montevideo, CYTED. 192 p.
12. Cazabán, M.; Rubio, D. 2014. Efecto de la fertilización nitrogenada tardía (V10-11) sobre el rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 96 p.
13. Cerveñansky, A. 2000. Azufre. Montevideo, Facultad de Agronomía. 26 p.
14. Chapman, S. J.; Kanda, K.; Tsurta, H.; Minami, K. 1996. Influence of temperature and oxygen availability on the flux of volatile sulfur compounds from wetlands: a comparison of peat and paddy soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. 42:279-288.
15. Clarkson, D. T.; Saker, L. R.; Purves, J. V.; Lee, R. B. 1989. Deprivation of nitrate and ammonium transport in barley plant with diminished sulphate status. Evidence of co-regulation of nitrogen and sulphate intake. *Journal of Experimental Botany*. 40:953-963.
16. Cordone, G.; Martínez, F. 2000. El azufre en el sistema productivo agrícola del centro-Sur de Santa Fé. *Informaciones Agronómicas*. IPNI. no. 5:12-15.
17. Crosland, A. R.; Zhao, F. J.; McGrath, S. P. 2001. Inter-laboratory comparison of sulfur and nitrogen analysis in plants and soils. *Communication in Soil Science Plant Analysis*. 32:685-695.
18. De Bona, F. D.; Fedoseyenko, D.; Van Wieren, N.; Monteiro, F. A. 2011. Nitrogen utilization by sulfur-deficient barley plant depends on the nitrogen form. (en línea). *Environmental and Experimental Botany*. 74: 237-244. Consultado 4 feb. 2012. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/envexpbot>
19. Díaz Zorita, M.; Garso, G.; Peralta, O. 1998. N y S en cultivos de canola en el Oeste bonaerense. In: Reunión Nacional de Oleaginosas (3^a, 1998, Bahía Blanca, Buenos Aires). Actas. Bahía Blanca, Universidad Nacional del Sur. Departamento de Agronomía/Asociación Argentina de Oleaginosas. pp. 203-204.
20. Echeverría, H.; Torres, N.; Bergonzi, R. 1996. Mineralización de azufre y su relación con la de azufre en suelos agrícolas. *Ciencia del Suelo*. 14 (2):107-109.
21. _____. 2005. Azufre. In: Echeverría, H. E.; García F. O. eds. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Buenos Aires, INTA. pp. 139-160.
22. _____.; Reussi Calvo, N.; Pagani, A.; Fernández, L. 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencia de azufre en los cultivos de trigo, soja de

segunda y maíz. In: Simposio Fertilidad (2011, Balcarce, Buenos Aires). Actas. Balcarce, INTA/UBA. FCA. pp. 98-107.

23. Eppendorfer, W. H. 1976. Effects of varying amounts of sulphur and nitrogen on yield, N/S ratio and amino-acid composition of successive cuts of Italian ryegrass. *Journal of Royal Veterinary and Agricultural University Yearbook* 1976:42-57.
24. Eriksen, J. 1996. Incorporation of S into soil organic matter in the field as determined by the natural abundance of stable isotopes. *Biology and Fertility Soils*. 22:149-155.
25. _____. 2005. Gross sulphur mineralization-immobilisation turnover in soil amended with plant residues. *Soil Biology & Biochemistry*. 37:2216-2224.
26. Ernst, O.; Siri, G. 2010. Manejo del suelo y rotación con pasturas; efecto sobre la calidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y el uso de insumos. *Informaciones Agronómicas*. IPNI. no. 45:22-26.
27. Ferreira, G. 2014. Diagnostico y manejo de la fertilización nitrogenada en el cultivo de canola (*Brassica napus*. L.). Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 68 p.
28. Freney, J. R.; Williams, C. H. 1983. The sulphur cycle in soil. In: Ivanov, M. V.; Freney, J. R. eds. *The global biogeochemical sulphur cycle*. New York, Wiley. cap. 3, pp. 129-201.
29. García Lamothe, A. 2002. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo pan. In: Jornada Técnica Cultivos de Invierno (2002, La Estanzuela, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 2-12 (Actividades de Difusión no.282
30. _____.; Quincke, A. 2011. El azufre en cereales de invierno: resumen de resultados experimentales y repaso de la teoría. *Revista INIA*. no. 24:37-40.
31. Hoffman, C.; Stockfisch, N.; Kock, H. 2004. Influence of sulphur supply on yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.)- determination of threshold value. (en línea). *European Journal of Agronomy*. 21:69-80. Consultado 15 mar. 2013. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/eja>
32. Hoffman, E.; Ernst, O. 1996. Refertilización en cebada cervecera. *Cangüé*. no. 6:1-3.

33. _____.; _____.; Perdomo, C. 1999. Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo en función de indicadores objetivos y su efecto en rendimiento y calidad de grano: validación de los modelos generados para cebada: resultados del primer año (1998). *In*: Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1ª.,1999, Mercedes). Memorias. s.n.t. pp. 19-27.
34. _____.; _____.; Viega, L.; Benítez, A.; Olivo, N.; Borghi, E. 2001. Efectos del exceso hídrico en los cultivos de invierno. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p. Consultado 12 nov. 2009. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/eemac/web.21>
35. _____.; _____. 2007. Diagnóstico del manejo de la fertilización en cultivos de secano en Uruguay. *In*: Seminario Internacional de Nutrición Vegetal (1º., 2007, Paysandú). Criterios para la fertilización de cultivos y pasturas. Paysandú, Facultad de Agronomía. EEMAC. 1 disco compacto.
36. _____.; Viega, L.; Cadenazzi, M.; Benitez, A.; Gestido, V.; Mesa, P.; Fernandez, R.; Baeten, A.; Glison, N. 2009. Bases morfo-fisiológicas que justifican el manejo diferencial de cultivares de trigo y cebada en Uruguay. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (1º., 2009, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía/IPNI Cono Sur. pp. 49-74.
37. _____.; Perdomo, C.; Ernst, O.; Bordoli, M.; Pastorini, M.; Pons, C.; Borghi, E. 2010. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas*. IPNI. no. 46:13-18.
38. _____.; Fassana, N.; Perdomo, C. 2013. Manejo de nitrógeno en cereales de invierno. ¿Agregando más nos estamos quedando cortos? *In*: Simposio Nacional de Agricultura (3º., 2013, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía/Hemisferio Sur. pp. 51-62.
39. _____.; _____.; Mazzilli, S.; Berger, A.; Ernst, O. 2015. La productividad parcial de los nutrientes. La necesidad de incrementar la eficiencia de uso de nitrógeno. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (4º., 2015, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía/Hemisferio Sur. pp. 131-140.
40. INIA. GRAS (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agro-clima y Sistema de Información, UY). 2009. Precipitación acumulada durante el trimestre set.-oct.-nov. 2009. (en línea) Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado 15 ago.2010. Disponible en <http://www.inia.uy/gras/Clima/Precipitaci%C3%B3n-nacional/Mapas-de-precipitaci%C3%B3n-acumulada>

41. Jamal, A.; Yong-Sun, M.; Abdin Malik, Z. 2010. Sulphur- a general overview and interaction with nitrogen. (en línea). Australian Journal of Crop Science. 4 (7):523-529. Consultado 16 set. 2014. Disponible en <http://www.cropj.com/>
42. McGill, W. B.; Cole, E. C. V. 1981. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. (en línea). Geoderma. 26:267-286. Consultado 21 abr. 2012. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/geoderma>
43. Mc Grath, S. P.; Zhao, F. J. 1996. Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). The Journal of Agricultural Science. 126:53-62.
44. Martínez, F.; Cordone, G. 1998. Fertilización azufrada en soja. In: Jornadas de Azufre (1998, Casilda, Santa Fe). Actas. Casilda, UEEA INTA. pp. 26-32.
45. Martino, D. L.; Ponce de León, F. 1999. Canola: una alternativa promisorio. Montevideo, INIA. 99 p. (Serie Técnica no. 105)
46. Mathot, M.; Thélér-Huché, L.; Lambert, R. 2009. Sulphur and nitrogen content as sulphur deficiency indicator for grasses. (en línea). European Journal of Agronomy. 30:172-176. Consultado 22 may. 2011. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/eja>
47. Mazzilli, S.; Hoffman, E. 2010. Respuesta a la fertilización con azufre en el cultivo de colza-canola en suelos del litoral Norte de Uruguay. Informaciones Agronómicas. IPNI. no. 46:18-21.
48. Melgar, R.; Gearhat, M. 2006. Manejo del azufre y fertilizantes azufrados en siembra directa. (en línea). Santa Fe, INTA Rafaela. 5 p. Consultado 21 dic. 2010. Disponible en <http://www.fertilizando.com/articulos/Manejo%20de%20Azufre%20y%20Fertilizantes%20Azufrados%20en%20SD.asp>.
49. Melsted, S. W.; Motto, H. L.; Peck, T. P. 1969. Critical plant nutrient composition volves useful in interpreting plant analysis data. Agronomy Journal. 61:17-20.
50. Messick, D. L. 1992. Soil test interpretation for sulphur in the United States. Sulphur Agriculture. no. 16:24-25.
51. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2009. Cultivos cerealeros e industriales. (en línea). Anuario Agropecuario 2009:78-91. Consultado 20 dic. 2012. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal>

52. Migge, A.; Bork, C.; Hell, R.; Becker, T. W. 2000. Negative regulation of nitrate reductase gene expression by glutamine or asparagines accumulating in leaves of sulfur-deprived tobacco. *Planta*. 211:587-595.
53. Monaghan, J.; Scrimgeour, C.; Stein, W.; Zhao, F. J.; Evans, E. J. 1999. Sulphur accumulation and redistribution in wheat (*Triticum aestivum*): a study using stable Sulphur isotope ratios as a tracer system. *Plant, Cell and Environment*. 22:831-839.
54. Morón, A. 1996a. Azufre: consideraciones sobre su situación en Uruguay. *In*: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 73-79 (Serie Técnica no. 76).
55. _____.; Baethgen, W. 1996b. Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo, INIA. 16 p. (Serie Técnica no. 73).
56. _____. 2005. Informe de la red de ensayos de fertilización y fijación biológica de nitrógeno en soja, 2003-2004. *In*: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (1ª., 2005, La Estanzuela- Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp.71- 81 (Actividades de Difusión no. 417).
57. Pagani, A.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo*. 27 (1):21-29.
58. _____.; Echeverría, H. 2011. Evaluación de métodos de diagnóstico de azufre en maíz: indicadores de suelo e indicadores vegetales. Utilidad del medidor de clorofila. *Informaciones Agronómicas*. IPNI. no. 2:38-45.
59. Perdomo, C.; Hoffman, E.; Pastorini, M.; Pons, C. 1999. Soil nitrate critical levels and nitrogen requirements for malting barley in Uruguay. *In*: Annual Meetings (14th., 1999, Salt Lake, Utah). *Agronomy Abstracts*. Salt Lake, Utah, ASA/CSSA/SSSA. pp: 312-312.
60. _____.; Barbazán, M. 2001. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
61. Planchón, M. E.; Figares, H. J. 2004. Fertilización en colza-canola (*Brassica napus* L.). Fenología y época de siembra en cultivares de *B. napus*, *B. rapa* y *B. juncea*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 192 p.
62. Prystupa, P.; Bergh, R.; Ferraris, G.; Loewy, T.; Gutiérrez Boem, F.; Ventimiglia, L. 2007. Fertilización nitrogenada y azufrada en cebada cervicera cv. Scarlett. *Informaciones Agronómicas*. IPNI. no. 38:5-11.

63. Randall, P.; Spencer, K.; Freney, J. 1981. Sulfur and nitrogen fertilization effects on wheat. Concentration of sulfur and nitrogen to sulfur ratio in relation to yield response. *Australian Journal of Agricultural Research*. 32:203-212.
64. Rasmussen, P. E.; Ramig, R. E.; Ekin, L. G.; Rohde, C. R. 1977. Tissue analyses guidelines for diagnosing sulfur deficiency in white wheat. *Plant Soil*. 46: 153-163.
65. Reussi Calvo, N.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H. 2008. Estimación del contenido de sulfatos en suelos del sudeste bonaerense. *Informaciones Agronómicas*. IPNI. no. 39:23-25.
66. _____.; _____. 2009. Azufre. *In*: Simposio Fertilidad IPNI Cono Sur (2009, Rosario). Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Acassuso, Buenos Aires, Argentina, IPNI. pp. 51-59.
67. _____.; Sainz Rozas, H.; Echeverría, H.; Berardo, A.; Diovisolvi, N. 2011. Fertilización nitrogenada en trigo. Contribuye la mineralización a mejorar el ajuste de la dosis? *Visión Rural*. no. 87:10-11.
68. Roberts, T. L. 2007. Right product, right rate, right time and right place...the foundation of best management practices for fertilizer. *In*: International Workshop on Fertilizer Best Management Practices (2007, Brussels, Belgium). Reports. Paris, France, International Fertilizer Industry Association. pp. 29-32.
69. Sakadevan, K.; Mackay, A. D.; Hedley, M. J. 1993. Sulphur cycling in New Zealand hill country pastures. II The fate of fertilizer sulphur. *Journal of Soils Science*. 44:615-624.
70. Salvagiotti, F.; Miralles, D. J. 2007. Wheat development as affected by nitrogen and sulfur nutrition. (en línea). *Australian Journal of Agricultural Research*. 58:39-45. Consultado 12 ago. 2014. Disponible en <http://www.publish.csiro.au/journals/ajar>.
71. _____.; Castellarin, J. M.; Mirsalles, D. J.; Pedrol, H. M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. (en línea). *Field Crops Research*. 113:170-177. Consultado 12 abr. 2013. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/fieldcrops>.
72. San Martín, N.; Navarro, C.; Echeverría, H. 1990. Concentración de azufre en granos de trigo de la región pampeana. *In*: Congreso Argentino de Trigo

- (2º., 1990, Buenos Aires, Argentina). Actas. Buenos Aires, AIANBA. pp. 28-32.
73. Scaife, A.; Burns, I. G. 1986. The sulfate-S/total S ratio in plants as an index of their Sulphur status. *Plant Soil*. 91(1):61-71.
 74. Scherer, W. H. 2001. Sulphur in crop production. (en línea). *European Journal of Agronomy*. 14:81-111 Consultado 23 jul. 2013. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/eja>.
 75. Schung, E.; Haneklaus, S. 1998. Diagnosis of sulphur nutrition. *In*: Schung, E. ed. *Sulphur in agroecosystems*. Dordrecht, Kluwer. pp. 1-38.
 76. Scott, N.; Dyson, P. W.; Ross, J.; Sharp, G. S. 1984. The effect of sulphur on the yield and chemical composition of barley. *Journal of Agriculture Science*. 103:699-702.
 77. Spencer, K.; Freney, J. R. 1980. Assessing the Sulphur status of field-grown wheat by plant analysis. *Agronomy Journal*. 72:469-472.
 78. Tisdale, S. L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D. 1993. *Soil fertility and fertilizers*. 5th. ed. New York, Macmillan. pp. 266-288.
 79. Torres Dugan, M.; Rodríguez, M. 2009. Buenas prácticas de manejo de fertilizantes azufrados: propiedades de las fuentes azufradas y su efectividad agronómica. *In*: Simposio Fertilidad IPNI Cono Sur (2009, Rosario). *Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos*. Acassuso, Buenos Aires, Argentina, IPNI. pp. 224-233.
 80. Ventimiglia, L.; Carta, H.; Rillo, S. 1999. Fertilización con azufre en trigo; curva de respuesta y comparación de fuentes. *Revista de Tecnología Agropecuaria*. 4(11):s.p.
 81. Vilche, M. S.; Cordone, G.; Martínez, F.; Galarza, C.; Gudelj, V.; Bisaro, V. 2002. Parámetros que condicionan la respuesta de soja (*Glycine max* (L) Merr.) a la fertilización azufrada. *In*: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (18º., 2002, Puerto Madryn). Actas. Buenos Aires, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. pp. 91-103.
 82. Vong, P.; Nguyen, C.; Guckert, A. 2007. Fertilizer sulphur uptake and transformation in soil as affected by plant species and soil type. (en línea). *European Journal of Agronomy*. 27:35-43. Consultado 30 nov. 2012. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/eja>.

83. Withers, P. J. A.; Tytherleigh, A. R. J.; O'donnell, F. M. 1995. Effect of Sulphur fertilizers on the grain yield and sulphur content of cereals. *The Journal of Agricultural Science*. no. 125:317-324.
84. Zhao, F. J.; McGrath, S. P. 1994. Soil extractable sulphate and organic sulphur and their availability to plants. *Plant and Soil*. 164:243-250.
85. _____.; Hawkesford, M. J.; McGrath, S. P. 1999. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *Journal of Cereal Science*. 30:1-17.
86. _____.; Fortune, S.; Barbosa, V. L.; Mc Grath, S. P.; Stobart, R.; Bilsborrow, P. E.; Booth, E. J.; Brown, A.; Robson, P. 2005. Effects of sulphur on yield and malting quality of barley. (en línea). *Journal of Cereal Science*. 43:369-377. Consultado 14 nov. 2012. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/jnlabr/yjcrs>.
87. Zhou, W.; He, P.; Li, S.; Lin, B. 2005. Mineralization of organic sulfur in paddy soils under flooded conditions and its availability to plants. (en línea). *Geoderma*. 125:85-93. Consultado 9 ago. 2011. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/geoderma>