

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESTUDIO DE LA FUENTE DE FERTILIZANTE COMO FACTOR DE CAMBIO
EN LA RESPUESTA A AZUFRE EN EL CULTIVO DE TRIGO

por

Andrés PUA

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2021

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Ing. Agr. Nicolás Fassana

Ing. Agr. Guillermo Siri

Fecha: 02 de diciembre de 2021

Autor: -----

Andrés Pua

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a las personas que colaboraron e hicieron que este ciclo que hoy termina fuera más fácil y más ameno para mí. En primer lugar a mi familia y amigos, por el apoyo y su paciencia.

También a “Tato”, el director de tesis, y a quienes colaboraron con el trabajo de campo, pero especialmente al Ing. Agr. Nicolás Fassana, quien estuvo presente y siempre a disposición para colaborar.

A Facultad de Agronomía por darme la oportunidad de estudiar y formarme en 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
1.1.1. <u>Objetivo general</u>	1
1.1.2. <u>Objetivos específicos</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. EL AZUFRE EN EL SISTEMA SUELO - PLANTA	2
2.2. FUNCIÓN DE AZUFRE EN LA PLANTA.....	3
2.3. RESPUESTA VEGETAL AL AGREGADO DE AZUFRE.....	3
2.4. DINÁMICA DE ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE.....	4
2.5. FUENTES DE NITRÓGENO Y AZUFRE	7
2.6. SÍNTOMAS DE DEFICIENCIA DE S.....	8
2.7. INDICADORES PARA EL DIAGNÓSTICO DE	8
SUFICIENCIA/DEFICIENCIA DE S.....	8
2.7.1. <u>Análisis de suelo</u>	8
2.7.2. <u>Análisis de planta</u>	9
2.7.3. <u>Curva de dilución de S</u>	10
2.8. HIPÓTESIS	11
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	12
3.1. UBICACIÓN	12
3.2. TRATAMIENTOS	12
3.2.1. <u>Descripción de las fuentes utilizadas y su comportamiento en el suelo</u>	13
3.3. DISEÑO Y MODELO ESTADÍSTICO	14

3.4. MANEJO DEL CULTIVO	15
3.5. DETERMINACIONES DURANTE EL CICLO DE CULTIVO.....	15
3.6. DETERMINACIONES POST COSECHA	16
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	17
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	17
4.2. VARIACIÓN DEL RENDIMIENTO EN GRANO Y SUS COMPONENTES	18
4.3. CRECIMIENTO Y ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE.....	21
4.3.1. <u>Crecimiento del cultivo</u>	21
4.3.2. <u>Absorción de N y S</u>	25
4.3.3. <u>Relación N:S</u>	33
5. <u>CONCLUSIONES</u>	37
6. <u>RESUMEN</u>	38
7. <u>SUMMARY</u>	39
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	40

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.		Página
1.	Tratamientos aplicados en Z.22.....	13
2.	Componentes del rendimiento, índice de cosecha y biomasa según tratamiento aplicado	20
3.	Biomasa acumulada por estadio y tratamientos	24
4.	Absorción de N y S por estadio para cada tratamiento	26
5.	Tasas de crecimiento, absorción de N y absorción de S entre Z.22 y Z.65	30
6.	RAS discriminada por tratamiento aplicado a Z.22	32
7.	Máximo S absorbido a Z.65, tasa media de absorción al máximo, N absorbido a Z.30 y relación entre absorción a Z.30 y Z.65	33
8.	Relación N:S por estadio para cada fuente en estudio	35
Figura No.		
1.	Precipitaciones y temperatura media mensual (arriba) y decádica (abajo), para la estación de crecimiento de trigo, del año 2017 con relación al promedio histórico de 15 años (2002 al 2017), para la FAGRO. EEMAC	18
2.	Relación entre el rendimiento en grano y sus componentes	19
3.	Relación entre sub-componentes de rendimiento del no. de granos por unidad de superficie	19
4.	Relaciones entre tasas de crecimiento en distintos momentos del cultivo y rendimiento en grano	22
5.	Evolución de la biomasa total durante el ciclo de cultivo, en función del de N y S agregado a Z.22	23
6.	Absorción de N y S en función de los días post siembra según agregado de N y S en Z.22	25
7.	Acumulación de biomasa y absorción de N y S en función de los días post siembra en dos ambientes, con y sin N agregado a Z.22	28
8.	Tasa de absorción de S en función de la tasa de crecimiento del cultivo y la tasa de absorción de N entre Z.30 y Z.65 por tratamiento	31
9.	Relación N:S de la biomasa aérea del cultivo en función del ciclo del cultivo	34

1. INTRODUCCIÓN

El uso continuado de fertilizantes fosforados sin contenido de azufre (S), durante el final del siglo XX y la primer década de siglo XXI, la mayor extracción de este nutriente debido a una mayor intensidad agrícola, mayor presencia de soja en el sistema, mayor productividad de los cultivos, y la reducción de ingresos al sistema por menor contenido en la lluvia (Schnug, de Ruiter y Martin, Scherer, citados por Ercoli et al., 2012), han llevado a una caída en la oferta de S para cereales de invierno, en Uruguay.

En la actualidad existen en el mercado una gran variedad de fuentes de nitrógeno (N) y S, con aparentes grandes diferencias. Las mismas combinan diferente relación N:S, las hay líquidas, sólidas, con distinta velocidad de liberación, y algunas de ellas con una propuesta por parte de las empresas, de marcada diferencia en la solubilidad de los nutrientes.

La escasa información acerca de la dinámica en el suelo y absorción por parte de los cultivos, de las distintas fuentes, y cómo son afectadas por las condiciones ambientales, en el marco de un escenario de alta demanda de nutrientes y de baja oferta por parte del suelo, llevan a que su uso dependa de disponer de este tipo de información y de la eficiencia de uso, para algunos de los cultivos del sistema de producción uruguayo.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es cuantificar la absorción de S por parte de un cultivo de trigo, con distintas fuentes de N y S, en dos ambientes (con y sin N limitante).

1.1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son: i) evaluar la curva de producción de biomasa, ii) la absorción acumulada de N y S para diferentes fuentes nitrógeno-azufradas de interés y iii) caracterizar a cada fuente en cuanto a la curva de aporte de S y recuperación aparente de S (RAS).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los fenómenos que caracterizaron a la expansión e intensificación de la agricultura a partir del año 2000 hasta el 2013-14, fue el incremento del área sembrada de soja, trigo, maíz y sorgo, la desaparición de la rotación con pasturas, la supresión del laboreo y un fuerte aumento en la extracción de nutrientes, muchos de los cuales no fueron cubiertos por la fertilización. Cómo históricamente fue sólo considerada la fertilización nitrogenada y fosforada, y como en el caso del azufre no existen aportes por fijación biológica, hoy se observa un ambiente con deficiencias generalizadas de este nutriente a nivel de chacras (Salvaghiotti et al. 2009, García Lamothe y Quincke 2011, Hoffman et al. 2013, 2015).

En la actualidad hay disponibles en el mercado una gran diversidad de fuentes nitrógeno-azufradas con distintas características. Sin embargo, para fuentes que solo aportan S, la información es escasa o nula, en particular para las más recientes en el mercado. Para poder tener información acerca del funcionamiento de algunas de las fuentes azufradas, se debe disponer de información de la absorción de S en el tiempo y cómo repercute en la respuesta y en la eficiencia de uso, y sus componentes.

2.1. EL AZUFRE EN EL SISTEMA SUELO - PLANTA

El ciclo del S presenta similitudes con el ciclo del N (Tisdale et al., 1993), debido a que ambos están muy relacionados a la dinámica de la materia orgánica (más del 90% se encuentra en forma orgánica), pero con menores entradas al sistema ya que no existen mecanismos de fijación biológica como vía de ingreso. Debido a la adopción de los sistemas con cero labranza (siembra directa) y la alta frecuencia de chacras sin rotación de pasturas, el potencial de mineralización de la materia orgánica se encuentra disminuido (García Lamothe 2002, Ernst y Siri 2010), lo que explica las deficiencias generalizadas de este nutriente a partir de la segunda década del siglo XXI.

Las fuentes de azufre disponible más importantes para las plantas son la materia orgánica, los minerales del suelo y los gases azufrados de la atmósfera. La fuente original son las rocas primarias con sulfuros metálicos como la pirita, que mediante la meteorización son oxidados, dando como resultado final, S bajo la forma de sulfatos. Otra fuente mineral de S es la fracción arcilla de algunos suelos con altos contenidos de óxidos de hierro y aluminio, y caolinita. Dichas arcillas son capaces de adsorber sulfatos desde la solución del suelo y liberarlos lentamente por intercambio aniónico, sobre todo en suelos con bajo pH (Echeverría, 2005).

En suelos de texturas gruesas se mineraliza una proporción mayor que en los de textura fina, y a su vez como la liberación de sulfatos 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), en Argentina, encontraron que, en sistemas bajo agricultura continua, el primer nutriente en aparecer como limitante fue el N, con relación al S. McGill y Cole, citados por Echeverría et al. (1996), opinan que el azufre es más resistente a la mineralización que el nitrógeno, por lo cual parece razonable que en las primeras etapas bajo agricultura continua se oxide más rápido el N que el S, y por lo cual el N sea el primero en ser deficiente para los cultivos. Los mismos autores, utilizando técnicas de incubación de muestras de suelo en laboratorio, encontraron que, si bien en los primeros momentos la relación N/S se reduce, posteriormente se mantiene estabilizada en valores cercanos a 12/1. Por otra parte, los valores más frecuentes encontrados en bibliografía se encuentran cercanos a 6-8/1 (Tisdale et al., 1993). Esta estabilidad en la relación N mineralizado/S mineralizado es lo que permite estimar la mineralización de S a partir de la mineralización del N.

La dinámica de S en el suelo está dominada por los procesos de inmovilización, mineralización y pérdidas. Hay dos tipos de procesos involucrados en la mineralización, la mineralización biológica y la mineralización bioquímica debido a hidrólisis enzimática (por actividad de sulfatasa, Haneklaus et al., 2007). La velocidad de aporte de sulfatos del suelo depende de factores que afecten la actividad microbiana (Haneklaus et al., 2007) y de la edad de la materia orgánica, siendo mayor en suelos con materia orgánica más joven (Ghani et al., 1993).

Las plantas absorben S mediante flujo de masa y casi exclusivamente bajo la forma de sulfato (SO_4^{2-}), siendo el aporte gaseoso poco significativo. La absorción de S- SO_4^{2-} no es inhibida por otros aniones (como NO_3^- o H_2PO_4^-), pero sí es inhibida por cromatos y selenatos. El S- SO_4^{2-} en solución y adsorbido representan el S más rápidamente disponible para las plantas. Para que el azufre elemental presente en el suelo pueda ser absorbido, debe ser mineralizado a sulfato, proceso regulado por la microflora del suelo y, por lo tanto, afectado por factores ambientales como temperatura, humedad, pH, y para el caso de un fertilizante, del tamaño de partícula (Tisdale et al., 1993).

La lixiviación es reconocida como el principal mecanismo de pérdida de azufre del sistema suelo-planta (McGrath, citado por Zhao et al., 1999), y su magnitud está asociada a características del suelo (las que afectan el transporte del agua a través de este, como la textura, capacidad de retención de agua, macroporosidad y presencia de horizonte B textural). También influyen el

balance precipitación–evapotranspiración, el tipo y estadio del cultivo, y su tasa de extracción de nutrientes (Melgar y Gearhart, 2006).

2.2. FUNCIÓN DE AZUFRE EN LA PLANTA

El S es requerido para la síntesis de aminoácidos azufrados (cistina, cisteína y metionina), los cuales son componentes esenciales de la proteína vegetal y comprenden alrededor del 90% del azufre en las plantas. La concentración de cisteína y metionina aumentan a medida que incrementa la concentración de azufre en las hojas. Plantas deficientes en azufre acumulan N no proteico como NH_2 y NO_3^- . Además, y a pesar de no constituirlos, el S es requerido para la síntesis de clorofila. El S también es una parte vital de la ferredoxina, una proteína hierro-azufrada presente en los cloroplastos, y que cumple un rol significativo en la reducción del NO_2^- y SO_4^{2-} , y asimilación de N a través de bacterias del suelo fijadoras de N (Tisdale et al., 1993).

2.3. RESPUESTA VEGETAL AL AGREGADO DE AZUFRE

El contexto actual, de larga historia agrícola, siembra directa (SD) y predominio del cultivo de soja, ha determinado cambios en la dinámica de N, provocando que una gran cantidad de chacras sean deficitarias en el aporte de este nutriente (Siri y Ernst 2009, Hoffman et al. 2010, 2013). Este hecho provoca cambios en la dinámica del S, volviéndose cada vez más frecuente e importante la respuesta al agregado de este nutriente (García y Salvaghiotti 2009, Mazzilli y Hoffman 2010, 2013). A esto se le suma el uso de fertilizantes más concentrados en P, sin S durante mucho tiempo en Uruguay, junto a la disminución de las emisiones locales de S, lo cual hace que las entradas de S al sistema sean menores (Hoffman y Ernst, 2008).

Los primeros trabajos relacionados a la respuesta al agregado de S en trigo datan de casi dos décadas atrás, con ganancias de rendimiento relativamente moderadas, del orden de $250 - 500 \text{ kg ha}^{-1}$ (García Lamothe 2002, Salvaghiotti et al. 2004, Zhao et al. 2005, Torres Duggan et al. 2006). En la actualidad, existen trabajos recopilados por IPNI (Steinbach y Álvarez, 2014), en los cuales se reportan respuestas a este nutriente significativamente superiores, llegando en algunos casos hasta 1620 kg ha^{-1} .

Algunos autores señalan que además de provocar aumentos en el rendimiento, también provocan mejoras en la calidad panadera del grano de trigo (Rendig, citado por Morón et al. 1996, Zhao et al. 1999). Sin embargo, otras investigaciones no son concluyentes sobre el tema (Reussi et al., 2006).

Salvaghiotti y Miralles (2008), reportaron que el agregado de S en trigo aumentó la biomasa del cultivo y el rendimiento en grano, con una interacción

positiva entre N y S, la cual se vio reflejada a través de la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN). Otros trabajos reportaron esta interacción, pero solamente a nivel de rendimiento en grano (Randall et al. 1981, Reneau Jr. et al. 1986).

Otros trabajos 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).

Como el S es un constituyente esencial de algunas enzimas involucradas en el metabolismo del N, como nitrato reductasa y nitrito reductasa (Mendel 1997, Campbell 1999, Swamy et al. 2005), su deficiencia puede inducir un descenso en la asimilación de N. Algunos trabajos han reportado acumulación de nitratos en plantas deficientes en S (Zaroug y Munns, 1980). En ambientes deficitarios en S es esperable que, a altas absorciones de N, la EUN pueda mejorar cuando se agrega S (Salvaghiotti et al. 2009, Hoffman et al. 2015).

Se ha reportado abundante evidencia que demuestra la interacción existente entre el N y el S, manifestándose a través de cambios en la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN, Salvaghiotti y Miralles 2008, Fontanetto et al. 2010, García 2013, Hoffman et al. 2013). Esta interacción queda demostrada especialmente en suelos con larga historia agrícola, de texturas livianas, bajo contenido de materia orgánica y alta extracción de nutrientes, donde el agregado de S mejora sensiblemente la producción de biomasa, rendimiento en grano, índice de cosecha, o ambos, en distintos cultivos, particularmente a elevadas dosis de N (Reneau Jr et al. 1986, Salvaghiotti y Miralles 2008, García y Salvaghiotti 2009, Salvaghiotti et al. 2009, Fontanetto et al. 2010, Mazzilli y Hoffman 2010, Hoffman et al. 2013).

2.4. DINÁMICA DE ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE

En la situación actual de disminución en la capacidad de aporte de los suelos y de creciente demanda por parte de los cultivos (Hoffman et al., 2013), se torna necesario conocer cómo ocurre la absorción de estos nutrientes para poder sincronizar la demanda con la oferta, y así mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes (García, 2004).

En el caso del nitrógeno, Perdomo y Barbazán (1999b), presentan una curva de acumulación del tipo sigmoidal, donde al principio la acumulación se da a una tasa baja, luego hay un período de máxima absorción (que se corresponde con el momento de mayor crecimiento del cultivo), y finalmente se reduce. Según García Lamothe, citado por García (2004), al principio del macollaje la tasa de absorción diaria de N (TAN) se ubica entre 1,5 y 2 kg de N ha⁻¹, llegando a ser máximas en el encañado, con tasas diarias de hasta 4 y 5

kg de N ha⁻¹. Es de importancia destacar que la magnitud de las tasas y la duración de cada una de estas etapas definen, en última instancia, el N total absorbido, e influyen factores tales como: fecha de siembra, largo de ciclo, variedad, capacidad de aporte del suelo, etc. (Perdomo y Bordolli 1999a, Hoffman et al. 2015).

Según Cha y Durán (2001), la etapa de mayor importancia en cuanto a la absorción de N ocurre entre Z.30 y Z.47. Dentro de este período, es de mayor relevancia el comprendido entre Z.33 y Z.47, donde se absorbe más del 50% del N absorbido durante el encañado.

Es importante destacar que la curva de absorción de N acompaña a la curva de acumulación de materia seca. Al compararlas, son similares, pero la de N ocurre antes en el tiempo (Perdomo y Barbazán, 1999b). Fueron reportados por Cha y Durán (2001) una serie de experimentos realizados en el litoral oeste de Uruguay, donde muestran una relación hasta apertura de vaina de hoja bandera (Z.47), de 33 kg ha⁻¹ de N absorbido por cada 1000 kg ha⁻¹ de MS producida.

Por otro lado, la absorción de S está estrechamente vinculada a la asimilación de C y N, existiendo una coordinación entre la asimilación de S y N (Zhao et al., 1999). Dijkshoorn y Van Wijk, citados por De Bona et al. (2011) sugieren que la absorción y asimilación de estos nutrientes depende de la relación de estos dentro de la planta. Sin embargo, hasta la etapa de antesis el cultivo de trigo absorbe entre un 50 y 60% del S que tendrá a madurez fisiológica (Monaghan et al. 1999, Zhao et al. 1999), mientras que llega a acumular para el mismo período entre un 70 y 80% del N (PyareLal y Sharma, citados por González y Trujillo 1995, García y Bernardo, citados por Reussi et al. 2012). Al enfocarse en la relación N:S en el ciclo del cultivo, más específicamente desde el comienzo del macollaje hasta elongación, según Reussi et al. (2012), esta relación va disminuyendo, explicado por una baja dilución del S respecto al N. Es así que Zhao et al. (1999), remarcan la importancia de que se mantenga un nivel adecuado de S durante todo el cultivo.

Por su parte, Hoffman y Ernst, citados por Cha y Durán (2001), determinaban que el potencial (en ese momento de 5000 kg de grano ha⁻¹ de cebada cervecera), se alcanzaba con 130 o 140 kg de N por ha⁻¹ absorbidos a espigazón, y que, por lo tanto, mayores cantidades absorbidas conllevaban a una caída en la eficiencia de uso del N (EUN) e incrementos en la concentración de N en grano (40 kg más absorbidos por aumentos del 1%). Mientras que las cantidades requeridas de S para un óptimo crecimiento pueden variar entre 15 y 20 kg ha⁻¹ durante el ciclo (Zhao et al., 1999). En el 2011, en la red de experimentos de manejo de N en trigo, Hoffman et al. (2015), reportaron como crítico 110 kg de N absorbido a Z 65 para alcanzar los

potenciales de rendimiento en chacras comerciales (plateau = 4740 kg de grano).

Zhao et al. (2005), reportan una respuesta significativa de la aplicación de S sobre el rendimiento y la calidad maltera en cultivos de cebada, con magnitudes de respuesta de entre 200 y 1200 kg ha⁻¹, con aumentos significativos de la calidad de la malta obtenida. Cuando el N fue limitante, la aplicación de S aumentó el rendimiento diluyendo el N en grano. En este experimento la respuesta se obtuvo con suelos con niveles de S menores a 5,4 ppm y con agregados de entre 10 y 20 kg ha⁻¹ de S. Por lo tanto, la eficiencia de uso del azufre (EUS) varió entre 20 y 60 kg de grano por kg de S aplicado, dependiendo de la dosis utilizada y las condiciones del cultivo.

En Uruguay existen antecedentes en el cultivo de colza, donde la adición de 20 kg ha⁻¹ produjo un aumento en el rendimiento cuatro veces superior al testigo sin fertilización azufrada (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, si no que el mejor indicador resultó ser el Índice de Nutrición de Azufre (INS) elaborado a partir de las curvas de dilución para dicho nutriente y cultivo, encontrando que para obtener un 90% de la MS es necesario un INS de 0.88, y por debajo de este nivel el incremento es lineal.

2.5. FUENTES DE NITRÓGENO Y AZUFRE

La elección de la fuente correcta es uno de los pilares de los cuatro requisitos (4Rs) de la nutrición de las plantas propuesto por Bruulsema et al. (2013), para un correcto y eficiente manejo de la fertilización. Un aspecto importante de las fuentes a la hora de elegir entre una y otra, es conocer la concentración de los distintos nutrientes que puede contener, la velocidad de aporte de estos, además de que cada una puede adecuarse mejor a distintos tipos de ambientes (humedad, pH, etc., Bruulsema et al., 2013).

Por su parte Tisdale et al. (1993), afirman que conociendo y manejando de manera correcta las distintas propiedades de las fuentes de fertilizantes, como ser, formación de ácido, contenido de elementos secundarios o de trazas de elementos, así como el método de aplicación y colocación, es probable que una fuente de fertilizante nitrogenado sea tan eficaz como cualquier otra desde el punto de vista de la respuesta en rendimiento.

Es posible caracterizar a las distintas fuentes de fertilizantes nitrogenados a través de la recuperación aparente del N (RAN), el sub-componente principal de la eficiencia de uso del N (EUN). La RAN representa el porcentaje de N aplicado con el fertilizante que es absorbido por el cultivo, y se

utiliza como indicador de su disponibilidad. De la misma manera se pueden a las fuentes por la recuperación aparente del S (RAS).

2.6. SÍNTOMAS DE DEFICIENCIA DE S

Los síntomas de deficiencia de S en trigo, al igual que en otras plantas, son caracterizados por una clorosis que se desarrolla en primera instancia en las hojas jóvenes, mientras que las hojas más viejas pueden permanecer verdes. Deficiencias de S resultan en un descenso en el contenido de clorofila y en la tasa de asimilación de CO₂ especialmente en las hojas jóvenes en desarrollo (Burke et al. 1986, Gilbert et al. 1997). La forma de aparición de los síntomas, primero en hojas jóvenes, sugiere que el S es relativamente poco móvil en planta.

En un ensayo realizado por Monaghan et al. (1999), se utilizaron dos fuentes de S que diferían en la relación de los isótopos estables ³⁴S/³²S para investigar la re-distribución del S al grano de trigo desde tejido vegetativo en un sistema de hidroponía. Se encontró que, en madurez fisiológica, un 14, 30, 6 y 50% del S en el grano provino de las siguientes etapas de crecimiento: entre emergencia e inicio de encañazón, entre encañazón y emergencia de hoja bandera, entre emergencia de hoja bandera y antesis, y después de antesis, respectivamente. Estos resultados indican que la absorción de S pre-antesis y post-antesis son igualmente importantes para acumular S en grano, y esto implica que el S debe estar disponible durante todo el ciclo del cultivo.

Numerosos trabajos han demostrado que el efecto de azufre principalmente afecta el número de granos por espiga, lo cual indica que deficiencias de azufre afectan ya sea reduciendo la diferenciación de espiguillas y/o flores, o aumentando la mortandad de flores (Archer 1974, Monaghan, citado por Ercoli et al.2011).

2.7. INDICADORES PARA EL DIAGNÓSTICO DE SUFICIENCIA/DEFICIENCIA DE S

2.7.1. Análisis de suelo

El análisis de suelo es un método usado ampliamente a nivel mundial para identificar suelos deficientes en ciertos nutrientes. En el caso del S varios métodos han sido propuestos para predecir su deficiencia. Muchos ensayos en maceta han mostrado buena relación entre el análisis de suelo y respuestas a la adición o absorción de S (Anderson et al. 1992, Zhao y McGrath 1994).

A nivel de campo, en presiembra, como herramienta para realizar diagnóstico de S basado en la determinación de S como sulfato ha mostrado

resultados contradictorios, tanto de 0-20 cm (Reussi Calvo et al. 2006, Pagani y Echeverría 2011) como de 0-60 cm (Prystupa et al. 2007, Pagani y Echeverría 2011, Carciocchi et al. 2016, 2018).

El análisis de suelo se ha comportado de mejor manera prediciendo suelos sin respuesta cuando el S se encuentra en grandes cantidades. Para la mayoría de los suelos cultivados con cantidades bajas a medias de S disponible, el análisis de suelo no fue una herramienta confiable para predecir sitios con respuesta a este nutriente. Debido a la falta de un análisis de suelo confiable, en el oeste de Estados Unidos, los fertilizantes con S son aplicados rutinariamente en suelos donde se ha observado respuesta en cultivos anteriores (Rasmussen y Kresge, 1986).

De manera general, cuando el nivel de $S-SO_4^{2-}$ es menor de 5 o 6 ppm, es posible hallar una buena respuesta al agregado de S, sin embargo, la respuesta es imprevisible dependiendo de las condiciones edafoclimáticas o específicas del cultivo. Con valores por encima de 10 o 12 ppm la probabilidad de respuesta al S disminuye significativamente, aunque según García Lamothe (2002), Morón (2005), García Lamothe y Quincke (2011) mencionan que es poco frecuente encontrar valores tan altos en los momentos en los cuales fueron desarrollados esos trabajos.

El crecimiento de los cultivos, la lixiviación, el escurrimiento superficial, la actividad de la biomasa microbiana, la aplicación de fertilizantes y el aporte de S atmosférico hacen que la concentración de S inorgánico en el suelo varíe durante el año. Es por esto por lo que, el contenido de sulfato determinado en una muestra de suelo es válido únicamente para el momento en que la misma fue extraída (Schnug 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, Pagani y Echeverría 2011).

2.7.2. Análisis de planta

Se propusieron varios indicadores para evaluar el estatus azufrado en trigo, como determinación de S total (Pinkerton, 1998), sulfato (Scaife y Burns, 1986), relación sulfato – azufre total (Spencer y Freney, 1980) y glutatión (Zhao et al., 1996) y los valores críticos determinados para cada indicador presentaron una gran variación dependiendo de la etapa de crecimiento del cultivo, parte de la planta analizada, condiciones experimentales y análisis realizado.

Según Dijkshoorn y Wijk (1967), debido a la fuerte interrelación entre N y S, las plantas tienden a mantener una relación relativamente constante entre

ambos nutrientes, aunque esta relación pueda variar ampliamente con la fertilización realizada. Reussi et al. (2012), determinaron que la relación N:S no es estable desde comienzo de macollaje hasta fin de elongación, y tiende a disminuir a medida que el cultivo se encuentra en estadios más avanzados, lo cual sucede debido a una dilución más lenta del S con relación al N. La tasa de acumulación de N disminuye en relación al S a medida que avanza el ciclo del cultivo, lo que sugiere que la acumulación de S es más tardía que la de N.

La concentración de S en grano no depende sólo de la disponibilidad de S, sino que también de la disponibilidad de N (Rasmussen et al. 1975, Randall et al. 1981, Flaetea et al. 2005, Lerner et al. 2006, Reussi et al. 2011). La concentración de S en grano y la relación N:S ha sido utilizada retrospectivamente para diagnosticar ambientes con deficiencia de S en trigo (Randall et al., 1981).

El requerimiento de S de un cultivo puede ser definido como la mínima cantidad de S necesaria para lograr el máximo rendimiento, a pesar de que estas cantidades pueden ser mayores al considerar aspectos de calidad. Este requerimiento está también relacionado con el rendimiento del cultivo (Zhao et al., 1995).

A pesar de que existe evidencia de la respuesta al agregado de este nutriente, aún persisten las dificultades para establecer un diagnóstico previo debido a la ausencia de un indicador confiable que permita predecir aquellos sitios donde es posible esperar respuesta al agregado (Zhao et al. 1999, Pagani y Echeverría 2011).

2.7.3. Curva de dilución de S

Así como ya fue propuesta la ecuación de la curva de dilución de N para trigo en Uruguay por Fassana et al. (2017), y como ya fue propuesto para otros cultivos como colza (Ferreira y Ernst, 2014), existen propuestas de curvas de dilución de S para trigo, entendiendo como S crítico la mínima concentración en tejido para cada valor de biomasa aérea que maximiza la tasa de crecimiento (TC) del cultivo (Reussi et al., 2012).

Las curvas de concentración de nutrientes en planta presentan el siguiente tipo de ecuación ($\% \text{ nutriente} = a \cdot MS^{-b}$), siendo “a” el valor de concentración de nutriente cuando la biomasa es 1 Mg ha^{-1} y “b” el coeficiente de dilución, que indica la magnitud de la caída de la concentración a medida que aumenta la biomasa aérea. Reussi et al. (2012) reportan un coeficiente “b” mayor para N que para S, lo cual produce una dilución menor del S que del N, que a su vez provoca la caída de la relación N:S, lo cual coincide con lo descrito anteriormente.

A raíz de este tipo de curvas, surgen propuestas para evaluación de estatus nitrogenado que bien pueden extrapolarse para azufre, como por ejemplo el índice de nutrición nitrogenada, calculado como el $\%Nt_{obs}/\%Nt_c$, donde $\%Nt_{obs}$ es el $\%Nt$ observado y el $\%Nt_c$ es la concentración de nitrógeno crítica para lograr una máxima TC a una biomasa determinada.

Este método permite diagnosticar el estado nutricional del cultivo, pero hasta el momento no se ha logrado calibrar un modelo para ajustar dosis de fertilizante azufrado a aplicar.

2.8. HIPÓTESIS

La hipótesis de este trabajo es que las diferencias entre algunas fuentes nitrógeno-azufradas de interés condicionan: i) la cantidad, ii) tasa y iii) relación de N:S absorbido por un cultivo de trigo a nivel de campo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

El experimento fue realizado en la zafra de invierno 2017 en el potrero 36 de la EEMAC (Estación Experimental Mario A. Cassinoni), Facultad de Agronomía., en el departamento de Paysandú, Uruguay (32°22'08.17" S, 58°03'56.18" O, elevación 42 m), sobre un antecesor pradera.

El ensayo se instaló sobre la unidad Young (MAP. DSF, 1979), con Brunosoles Éutricos Típicos Fr. como suelos dominantes, según carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000. Corresponde a la formación Fray Bentos y se clasifica dentro del Grupo Coneat 11.3.

El cultivar de trigo sembrado (28 de junio) fue DM Ceibo, caracterizado por ser de ciclo intermedio, con elevado potencial de rendimiento (INIA e INASE 2018, Hoffman et al. 2018).

3.2. TRATAMIENTOS

El experimento constó de 9 tratamientos, incluyendo un testigo sin fertilizar, donde la fertilización se realizó a Z.22 (4 de agosto). La fuente de fertilizante fue el factor principal, mientras que el factor secundario fue el agregado o no de N y S en el mismo estadio fenológico.

La dosis de N se definió en base a concentración de N-NO_3^- en los primeros 20 cm (10 ppm) y al nivel crítico (N_c) en suelo y planta, según la propuesta para el manejo del N en cultivos de invierno (Hoffman et al., 2010). La dosis de S se definió en 10 kg S ha^{-1} .

Las fuentes de fertilizante utilizadas fueron urea, urea + Nitrolock, urea azufrada, azufertil y S90. Todos los tratamientos fueron fertilizados a la siembra según N_c , y posteriormente en Z.30 con $50 \text{ kg de N por hectárea}$.

Cuadro 1. Tratamientos aplicados en Z.22

Tratamiento	Fuente	N (kg ha ⁻¹)**	S (kg ha ⁻¹)	Relación N:S
1	Testigo	0	0	-
2	Azufertil (&)	0	10	0
3	S90 (&)	0	10	0
4	Urea	35	0	-
5	Urea + Nitrolock	35	0	-
6	Urea + Nitrolock + S90	35	10	3,5
7	Urea + Azufertil	35	10	3,5
8	Urea + S90	35	10	3,5
9	Urea azufrada (36-10)*	35	10	3,5

&.-Azufertil, 18.6% de S (ASP- Nutrien); S90, 90% de S (MACCIO – Cultivar).

*.- Mezcla de urea azufrada 40N - 6S (75%) – Sulfato de amonio (25%). **. Surge del modelo de UdelaR. - FAgro, en base a NC = 15 ppm, EF = 7 kg de N 1 ppm⁻¹ por debajo del Nc y valor en suelo al inicio del experimento de N-NO₃ = 10 ppm.

3.2.1. Descripción de las fuentes utilizadas y su comportamiento en el suelo

En este trabajo se estudian las siguientes fuentes nitrogenadas y/o azufradas: urea, sulfato de amonio, azufre elemental, azufertil. También se utilizó un aditivo para las fuentes nitrogenadas cuyo nombre comercial es Nitrolock, producto a base de NBPT (N-(n-butyl) thiophosphorictriamide) y DCD (diciandamida).

La urea es una sustancia orgánica sintetizada a partir de amoníaco y dióxido de carbono mediante el proceso de Bosch-Meier. Es una fuente amoniacal, cuya primera reacción en el suelo es de hidrólisis, proceso catalizado por la enzima ureasa la cual es sensible a humedad y temperatura. En este proceso ocurre un aumento de pH, lo cual favorece las pérdidas de NH₃ por volatilización. Posteriormente, el amonio sufre el proceso de nitrificación, el cual se da en dos etapas, de amonio a nitrito catalizado por la enzima nitrito reductasa principalmente del grupo de bacterias llamadas nitrosomonas, y luego de nitrito a nitrato, catalizada por la enzima nitrato reductasa por parte de

las nitrobacter. En este proceso de nitrificación ocurre un marcado descenso de pH en el suelo.

El sulfato de amonio es una sal formulada a partir de amonio y ácido sulfúrico, contiene un 21% de N y 24% de S. Al aplicarlo al suelo se divide rápidamente en ion amonio y sulfato. El amonio es convertido en nitrato por el complejo de bacterias nitrosomonas-nitrobacter. En cuanto al sulfato liberado, es una fuente rápida de aporte de S porque ya se encuentra en forma biodisponible para el cultivo.

El azufertil es una fuente azufrada elaborada principalmente en base a sulfato de calcio, aunque posee una mayor solubilidad en agua que este. Está compuesto por 18,6% de S y 23,4% de Ca. Su solubilidad depende del suelo y de las condiciones de humedad de este, y al disolverse libera Ca^{2+} y SO_4^{2-} .

El azufre elemental, en este caso S90, es un fertilizante granulado con un 90% de azufre molido fino. El S elemental no es soluble en agua, y para poder ser utilizado por las plantas debe ser oxidado por las bacterias del suelo (Thiobacillus) a sulfato. La reacción general es $2\text{S} + 3\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4$. La velocidad de este proceso microbiano depende de factores ambientales como humedad y temperatura, como de las propiedades físicas del fertilizante (por ej.: tamaño de partícula), por lo cual no está rápidamente biodisponible (IPNI, s.f.).

El NBPT es un aditivo que se utiliza tanto para fuentes sólidas como líquidas, que actúa como inhibidor de la ureasa, por lo cual retrasa la hidrólisis de la urea, lo que disminuye las pérdidas por volatilización y aumenta la eficiencia de uso del N. Por su parte, la DCD es una molécula utilizada para retrasar la nitrificación del amonio, ralentizando el pasaje de amonio a nitrito, actuando sobre el grupo de las nitrosomonas. A altas concentraciones puede resultar fitotóxica.

3.3. DISEÑO Y MODELO ESTADÍSTICO

El diseño estadístico utilizado fue de bloques completos al azar, con 4 repeticiones.

El modelo estadístico empleado para el análisis estadístico fue el siguiente:

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

Dónde:

Y_{ij} = Variable de respuesta

μ = Media general

β_j = Efecto del j-ésimo bloque

A_i = Efecto de la i-ésima fuente

ε_{ij} = Error experimental

Los bloques fueron ubicados en función de la pendiente. La unidad experimental, la cual corresponde a una parcela fue de $8,5\text{m}^2$ ($1,7\text{m} \times 5\text{m}$).

Los análisis estadísticos fueron realizados con el programa InfoStat.

3.4. MANEJO DEL CULTIVO

El cultivo fue sembrado el 28 de junio de 2017 (emergencia: 7 de julio), buscando lograr una población de 45 plantas por metro lineal (Hoffman et al., 2015), y con una distancia entre líneas de 17 cm, se obtuvo una población de $270 \text{ plantas.m}^{-2}$. A la siembra el área experimental presentó 8 ppm de N-NO_3^- , 4 ppm de P Bray I y 0,61 meq K / 100 gr suelo, por lo cual se fertilizó el 3 de julio con 175 kg ha^{-1} de fosfato diamónico (18-46).

El 4 de agosto el cultivo alcanza el estadio Z.22, aplicándose el mismo día 15 g ha^{-1} de Clearb para el control de malezas de hoja ancha. En este momento se volvió a realizar análisis de suelo, pero esta vez una muestra compuesta por bloque, arrojando el análisis los valores de 9, 11, 10 y 11 ppm de N-NO_3^- para los bloques I, II, III y IV, respectivamente.

El estadio Z.30 fue alcanzado el 30 de agosto, donde fueron realizados los análisis de concentración de nitrógeno en planta, obteniéndose el valor promedio de 2,7%. En este estadio a todos los tratamientos se les agrego 50 kg ha^{-1} de N. El 6 de setiembre se alcanzó el estadio Z.33, y 13 días más tarde se realizó una aplicación de Xantho (carboxamida, triazol y estrobilurina) para el control de enfermedades foliares.

El 5 de octubre (4 días previos a antesis), se realizó la aplicación conjunta de Swing Plus e Intrepid, fungicida indicado principalmente para la prevención de fusariosis de la espiga (*Fusarium* spp.), y un insecticida hormonal acelerador de muda para el control de lepidópteros. Esta aplicación conjunta fue repetida nuevamente el 30 de octubre.

La cosecha fue realizada el 4 de diciembre, en primer lugar 2 metros lineales dentro de cada parcela a ras del suelo, dando un área de cosecha de $0,34 \text{ m}^2$. Posteriormente se realizó la cosecha con una máquina WintersteigerClassic, limpiando luego los granos con sopladora a los efectos de eliminar restos y suciedades de la trilla.

3.5. DETERMINACIONES DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO

Las determinaciones realizadas en muestras de suelo fueron tomando los primeros 20 cm del perfil.

En el momento de la siembra: se determinó en suelo N-NO₃, mediante CuSO₄ y potenciometría. K intercambiable con acetato de amonio pH7 y emisión atómica. P Bray I espectrofotométrico establecido por Bray y Kurt en el año 1945.

Durante el ciclo del cultivo: se determinó en planta, biomasa aérea (MS), %N y %S en planta en los estadios Z.22, Z.30, Z.33, Z.65 y a cosecha (C). En este último estadio se contabilizó el número de espigas, usando como muestras dos hileras paralelas de un metro lineal por tratamiento.

La materia seca (MS) fue determinada mediante cortes de la parte aérea de la planta (muestras de 0,09 m²) y posterior secado en estufa y pesaje, en Z.22 por bloque y posteriormente por tratamiento. El contenido de N (%N) y de S (%S) fueron realizados mediante el método de combustión seca de Dumas.

3.6. DETERMINACIONES POST COSECHA

Luego de la cosecha se realizó el procesamiento físico de las muestras de grano, realizándose las siguientes determinaciones: peso total de las muestras por balanza para obtener rendimiento por hectárea, peso de grano obtenido contando tres submuestras de 100 granos cada una y pesándolos en balanza, porcentaje de humedad con humidímetro y peso hectolítrico mediante balanza de Schopper.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El año 2017 se caracterizó por un invierno muy lluvioso, particularmente en los meses de agosto y setiembre, y temperaturas superiores a la media histórica (Figura 1). Durante la estación de crecimiento del cultivo, de junio a noviembre, las precipitaciones acumularon 831 mm, superando a la media en un 37%. En contraparte, las precipitaciones de junio fueron escasas (20 mm), no obstante, no se vio comprometida la implantación del cultivo. En los meses de agosto y setiembre las precipitaciones superaron ampliamente el registro histórico totalizando 526 mm (Figura 1).

Otro aspecto que considerar en este año, es el relacionado con el suministro de fotoasimilados a órganos reproductivos a través del coeficiente fototermal (Q) durante el período crítico (PC, Fischer, 1985). En este año, el Q ($1,41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) se ubicó por debajo de lo que son los valores asociados con los años de elevado potencial (Ernst et al., 2016).

En cuanto a la temperatura, fue superior a la media histórica para casi toda la estación de crecimiento (Figura 1), y probablemente haya incidido negativamente sobre el macollaje, acortando el ciclo y por tanto adelantando el inicio de encañazón.

En conjunto con el exceso de precipitaciones, las condiciones de crecimiento durante el período crítico fueron desfavorables (Hoffman et al. 2009, Ernst et al. 2016). En este sentido, el año se caracteriza como desfavorable para los cultivos de invierno (Hoffman et al., 2018) y ésta fue la situación general registrada tanto para trigo como cebada en el Uruguay, llevando a un bajo rendimiento medio nacional de ambos cereales (MGAP. DIEA, 2018).

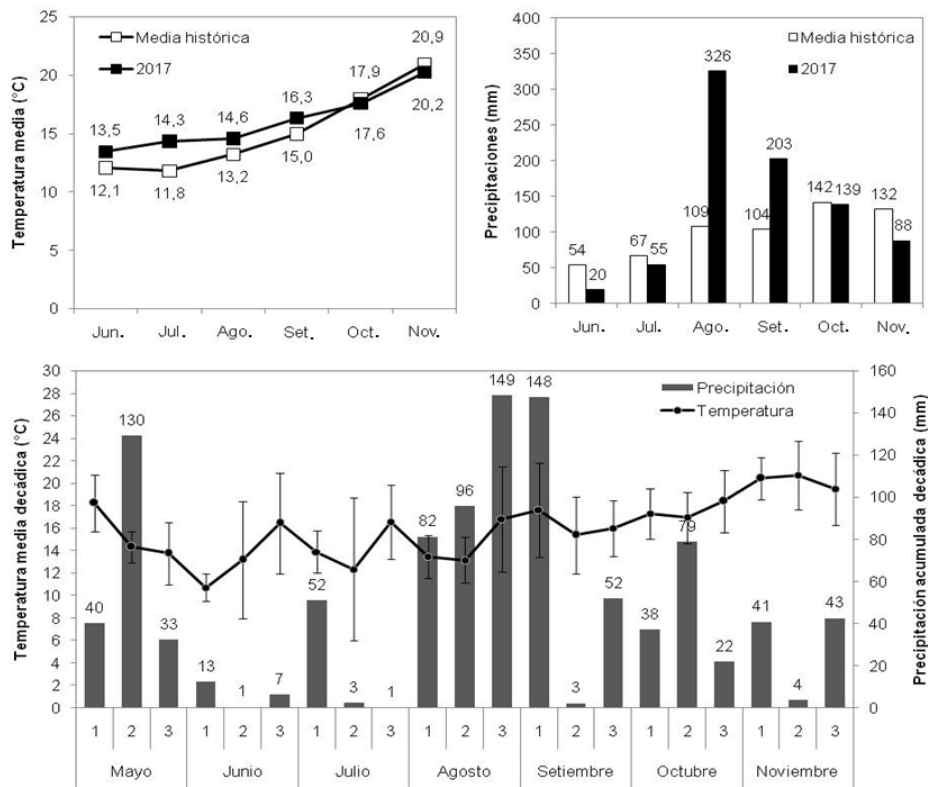
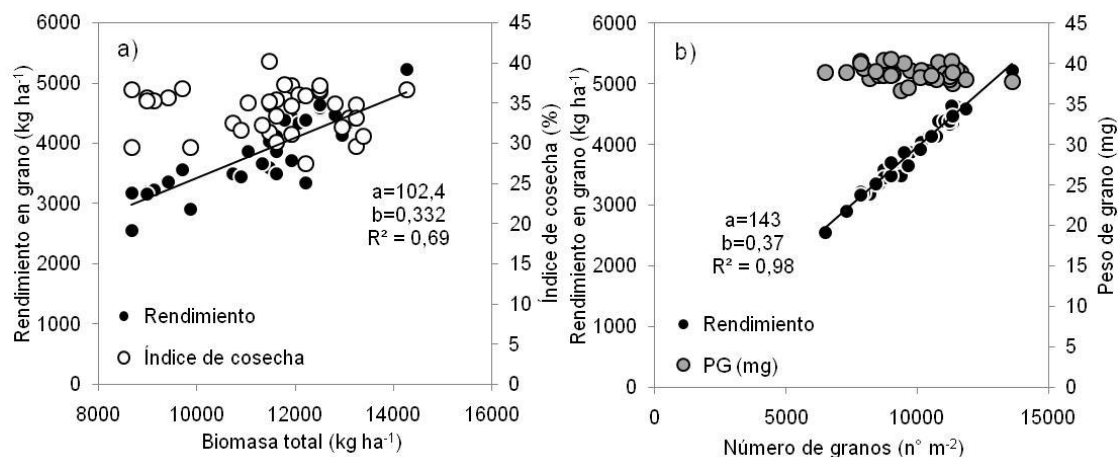


Figura 1. Precipitaciones y temperatura media mensual (arriba) y decádica (abajo), para la estación de crecimiento de trigo, del año 2017 con relación al promedio histórico de 15 años (2002 al 2017), para la FAGRO. EEMAC

4.2. VARIACIÓN DEL RENDIMIENTO EN GRANO Y SUS COMPONENTES

La media general de rendimiento del ensayo fue de 3926 kg ha⁻¹, y se encontró dentro de un rango que varió entre los 2563 kg ha⁻¹ y los 5231 kg ha⁻¹, similar a los resultados obtenidos en el programa de caracterización de cultivares de trigo en el mismo año y fecha de siembra (Hoffman et al., 2018).

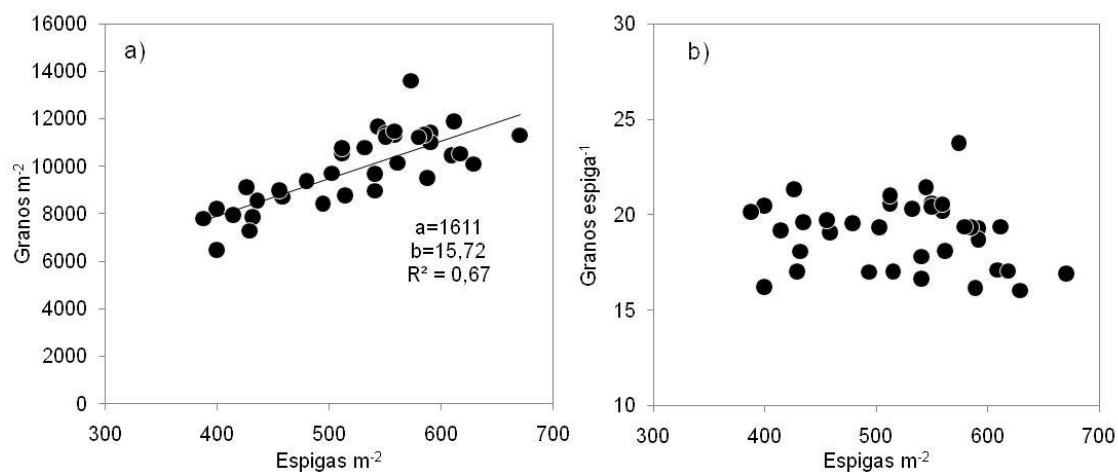
La variación en rendimiento en grano se asoció con la variación en biomasa a cosecha (Figura 2a), aunque con un menor ajuste al obtenido por Dall'Orso et al. (2016, R² de 0,69 vs. 0,95), lo cual implica que no necesariamente el tratamiento con mayor biomasa a cosecha fuera el que obtuviera mayor rendimiento en grano siempre. Por otro lado, el número de granos fue el componente más importante y se correlacionó muy estrechamente con el rendimiento en grano (R²=0,98; Figura 2b), lo cual coincide con lo descrito por Fisher (1985).



a) Rendimiento en grano e índice de cosecha en función de la biomasa total a cosecha; b) rendimiento en grano y peso de grano en función del número de granos.

Figura 2. Relación entre el rendimiento en grano y sus componentes

El aumento en el número de granos se debió a mayor número de espigas m⁻² y no debido a un incremento en el número de granos por espiga (Figura 3b), no encontrándose relación competitiva entre número de espigas y número de granos por espiga (Figura 3a).



a) Granos m⁻² en función de espigas m⁻²; b) Granos por espiga en función de espigas m⁻².

Figura 3. Relación entre sub-componentes de rendimiento del no. de granos por unidad de superficie

Analizando los datos de los componentes de rendimiento (Cuadro 2), a pesar de que no hubo diferencias significativas entre tratamientos, y en

comparación a los obtenidos en el ensayo de caracterización de trigo para el mismo año y cultivares de referencia, se obtuvo un bajo número de granos por unidad de superficie (9920 vs. 20550 gr m⁻²). El responsable directo de esta merma en el número de granos por unidad de superficie es el número de granos por espiga (19 vs. 43 gr esp⁻¹), y no el número de espigas por metro (523 vs. 507 esp m⁻²). En cuanto al rendimiento propiamente dicho, se obtuvo un rendimiento promedio sensiblemente menor que en caracterización de trigo (3926 vs. 5523 kg ha⁻¹), lo cual responde a una menor biomasa total acumulada a cosecha (11507 vs. 19646 kg ha⁻¹) y no es resultado de un menor índice de cosecha, que incluso es mayor para este ensayo (34 vs. 28%), lo cual es lógico debido a que el cultivo tuvo que llenar menor número de granos y por lo tanto se obtuvieron granos más pesados (39 vs. 25 mg, Hoffman et al., 2018).

Cuadro 2. Componentes del rendimiento, índice de cosecha y biomasa según tratamiento aplicado

Fuente	E* (no.)	GE* (no.)	GM* (no.)	PG* (mg)	RE* (kg ha ⁻¹)	IC* (%)	BMT* (kg MS ha ⁻¹)
Testigo	468	19	9067	39	3642	35	10478
Azufertil	542	19	10414	40	4190	35	12022
S90	465	19	8733	39	3473	34	10221
Urea	541	19	10412	38	4044	34	11875
Urea + Nitrolock	551	18	10098	40	4080	34	11949
Urea + Nitrolock + S90	467	18	8656	38	3399	33	10184
Urea + Azufertil	564	19	10921	39	4276	34	12537
Urea + S90	552	19	10397	39	4093	34	12206
Urea azufrada	560	19	10585	38	4134	34	12096
Promedio	523	19,0	9920	38,9	3926	34	11507
p-valor	0,22	0,98	0,293	0,06	0,281	0,1	0,12
CV	13,6	9,2	15,3	2,1	14,6	6,8	12,0

*E (espigas m⁻²); GE (granos espiga⁻¹); GM (granos m⁻²) PG (peso de grano); RE (rendimiento en grano); IC (índice de cosecha); BMT (biomasa a cosecha).

4.3. CRECIMIENTO Y ABSORCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE

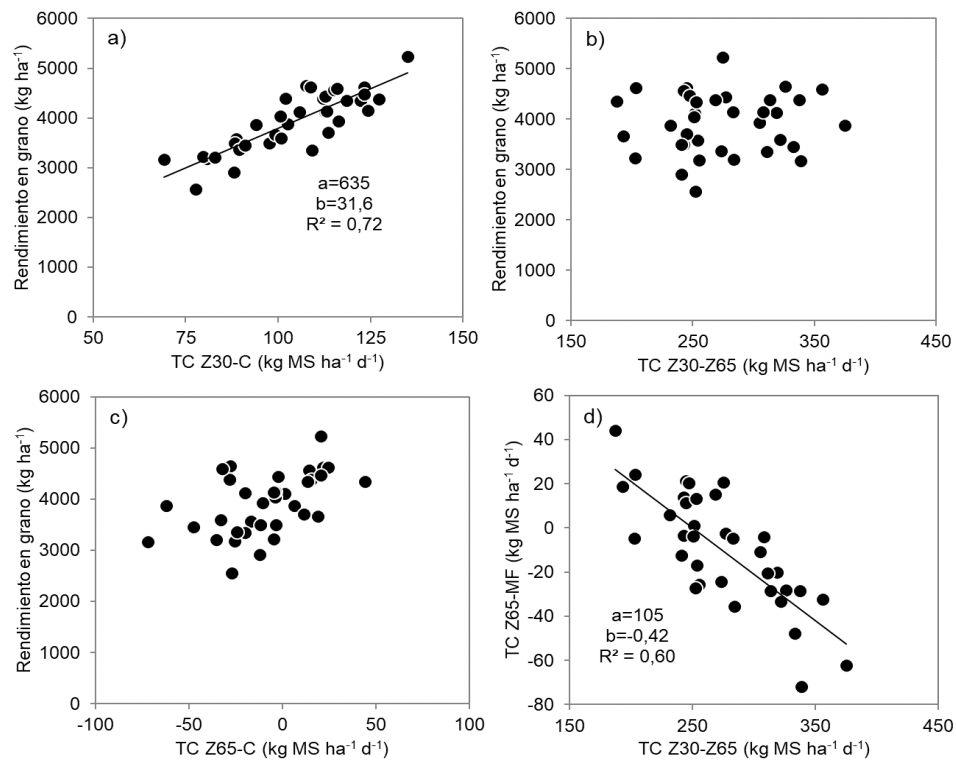
4.3.1. Crecimiento del cultivo

La biomasa a cosecha estuvo relacionada con el rendimiento en grano, sin embargo, el crecimiento a Z.30 no mostró relación estrecha con el RE (R^2 : 0,017), sin alcanzar los niveles críticos en biomasa propuestos de 2330 kg MS ha^{-1} para trigo (Hoffman et al., 2013), lo cual concuerda con los niveles de rendimiento en grano obtenidos en este ensayo. El crecimiento obtenido posteriormente a Z.30 (entre Z.30 y C) si estuvo vinculado con el rendimiento en grano (R^2 : 0,72). Entre Z.30 y Z.65 las condiciones de radiación y temperatura no fueron favorables, pero a partir de Z.65 el Q superó el histórico con condiciones muy buenas de alta radiación y baja temperatura para el proceso de llenado de grano.

Las parcelas que experimentaron una mayor TC entre Z.30 y Z.65, luego de Z.65 detuvieron su crecimiento o incluso tuvieron tasas de crecimiento negativas (Figura 4a). Perdieron biomasa, lo cual es esperable porque si bien comienza el período de llenado de grano, también ocurre el proceso de senescencia. Por otro lado, las parcelas que experimentaron tasas de crecimiento más bajas entre Z.30 y Z.65, luego de Z.65 continuaron creciendo a tasas más bajas (Figura 4d), esto puede deberse, a modo de hipótesis, a que por un efecto bloque o tratamiento hubiera parcelas más atrasadas fenológicamente y por tanto continuaran acumulando materia seca sin entrar aún en senescencia. De Vos (1979) reporta que una adecuada nutrición nitrogenada prolonga la duración del área foliar, y que cada día más de duración de la hoja bandera incrementa la materia seca en 200 kg ha^{-1} .

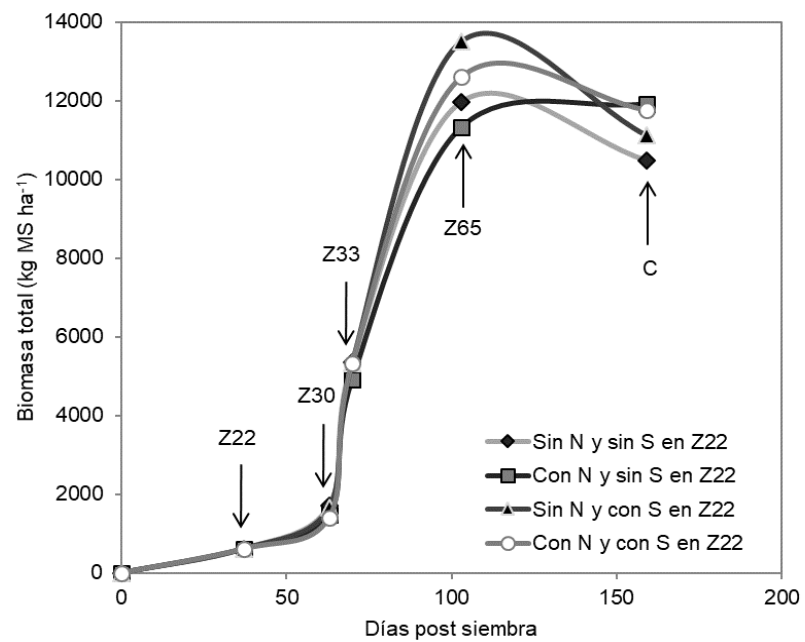
Las parcelas que tuvieron mayores tasas de crecimiento entre el período Z.30 – C fueron las que lograron concretar rendimientos mayores, asociado a la mayor biomasa total a cosecha (Figura 4a).

Los tratamientos fueron aplicados a Z.22, diferenciándose los tratamientos entre sí a Z.65, con una mayor acumulación general en los tratamientos con aplicaciones de S (Cuadro 3). Posteriormente a Z.65 se pierden las diferencias estadísticas, probablemente debido a las condiciones climáticas desfavorables para los cultivos de invierno, que fueron un factor limitante del potencial de los distintos tratamientos. Como fue mencionado anteriormente, ninguno de los tratamientos logró alcanzar el nivel crítico de biomasa a Z.30 de 2330 kg ha^{-1} para cultivos de alto potencial propuesto por Hoffman et al. (2013), lo cual concuerda con el bajo nivel de rendimiento obtenido en este ensayo.



a) Rendimiento en grano en función de la tasa de crecimiento de Z.30 a C. b) Rendimiento en grano en función de la tasa de crecimiento de Z.30 a Z.65. c) Rendimiento en grano en función de la tasa de crecimiento de Z.65 a C. d) Tasa de crecimiento de Z.65 a C en función de la tasa de crecimiento de Z.30 a Z.65.

Figura 4. Relaciones entre tasas de crecimiento en distintos momentos del cultivo y rendimiento en grano



Días post siembra (DPS) por estadio: Z.22, 37 días; Z.30, 63 días; Z.33, 70 días; Z.65, 103 días; C, 159 días.

Figura 5. Evolución de la biomasa total durante el ciclo de cultivo, en función del de N y S agregado a Z.22

Cuadro 3. Biomasa acumulada por estadio y tratamientos

Tratamientos	Biomasa acumulada				
	----- (kg ha ⁻¹) -----				
N y S a Z.22	Z.22	Z.30	Z.33	Z.65	C
Testigo (0N - 0S)	664	1702	5349	11962 AB	10478
Azufertil (0N - 10S)	664	1654	5487	13539 A	12022
S90 (0N - 10S)	664	1653	5183	13462 A	10221
Urea (35N - 0S)	664	1609	5378	10429 B	11875
Urea + Nitrolock (35N - 0S)	664	1334	4447	12192 AB	11949
S90 + urea + Nitrolock (35N - 10S)	664	1478	5514	10841 B	10184
Azufertil + urea (35N - 10S)	664	1520	5409	13693 A	12537
S90 + urea (35N - 10S)	664	1064	5071	12031 AB	12206
Urea azufrada (35N - 10S)	664	1565	5309	13807 A	12096
Promedio	664	1509	5239	12440	11508
DMS	-	-	-	3382	-
p-valor	-	0,1109	0,8964	0,0324	0,1203
CV (%)	-	19,41	19,29	12,54	11,98

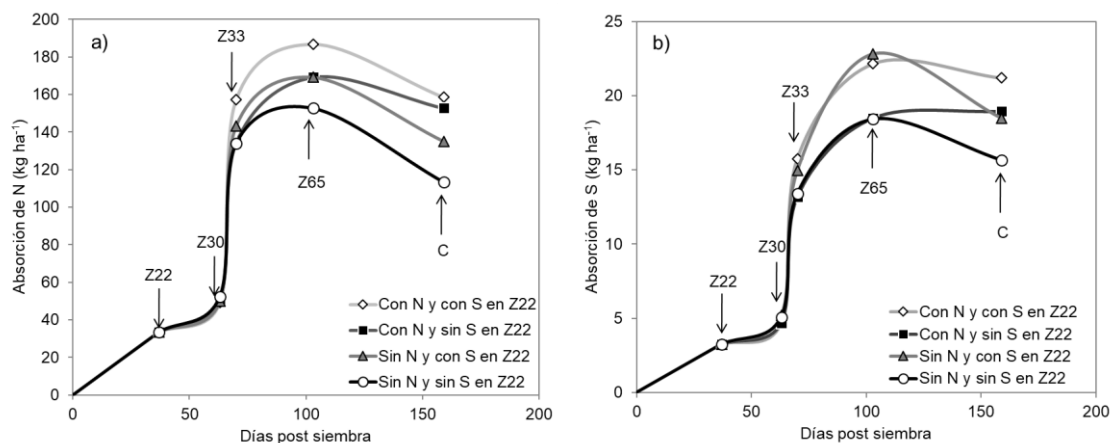
*Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas para un LSD Fisher con un $\alpha=0,05$.
Días post siembra (DPS) por estadio: Z.22, 37 días; Z.30, 63 días; Z.33, 70 días; Z.65, 103 días;
C, 159 días (datos de análisis de rastrojo).

El crecimiento del cultivo es representado correctamente por una curva de forma sigmoide (PyareLal y Sharma, 1973). Con un crecimiento inicial desde siembra hasta Z.30 de 24 kgMS ha⁻¹d⁻¹, inferior, aunque muy cercano a los 25 kg MS ha⁻¹d⁻¹ reportados por Cha y Durán (2001), Mazzilli (2004) y superior a los 22 kgMS ha⁻¹d⁻¹ obtenidos por Dall'Orso et al. (2016). Cabe mencionar que el cultivo nació en junio, y el cultivar empleado (DM Ceibo) es un cultivar de baja capacidad de macollaje y lento crecimiento inicial, por lo cual no es esperable obtener una TC inicial muy elevada.

4.3.2. Absorción de N y S

Al estudiar cómo fue la absorción de N (según agregado o no de N y S en Z.22) en el ciclo de cultivo, se obtuvo un valor máximo en torno a los 180 kg ha⁻¹ en Z.65. A fin de ciclo, todos los tratamientos fertilizados con N a Z.22 (con y sin S), presentan mayores niveles de absorción de N que el tratamiento testigo (Figura 6a). La máxima TAN ocurre en el período de tiempo comprendido entre Z.30 y Z.33, con una tasa de absorción promedio para todo el ensayo de 14 kg Nha⁻¹d⁻¹, coincidiendo con la máxima producción de biomasa. García Lamothe, citado por García (2004), reporta como tasa de absorción en trigo para el período Z.30 – Z.65, valores de 3 a 4 kg N ha⁻¹d⁻¹, estando este ensayo dentro de estos valores (3,1 kg Nha⁻¹d⁻¹).

En cuanto a la absorción de S, los grupos de tratamientos que fueron fertilizados con S en Z.22, alcanzaron mayores niveles de absorción de S, con valores máximos en Z.65 en el entorno de 23 kg ha⁻¹ (Figura 6b). La máxima tasa de absorción diaria de S, al igual que la máxima TAN, coincide con la máxima TCC, con un valor promedio de 1,4 kg S ha⁻¹d⁻¹.



*Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas para un Tukey con un $\alpha=0,05$. Días post siembra (DPS) por estadio: Z.22, 37 días; Z.30, 63 días; Z.33, 70 días; Z.65, 103 días; C, 159 días.

a) Absorción de N; b) absorción de S.

Figura 6. Absorción de N y S en función de los días post siembra según agregado de N y S en Z.22

Cuadro 4. Absorción de N y S por estadio para cada tratamiento

Tratamiento	Nitrógeno absorbido ----- kg ha ⁻¹ -----				Azufre absorbido ----- kg ha ⁻¹ -----			
	Z.22	Z.30	Z.33	Z.65	Z.22	Z.30	Z.33	Z.65
N y S a Z.22								
Testigo	34	52	134	153 B	3,3	5,1	13	18,4 AB
Azufertil	34	49	153	167 AB	3,3	5,5	16	23,6 AB
S90	34	50	134	172 AB	3,3	4,9	14	22 AB
Urea	34	55	152	151 B	3,3	5	14	16,8 B
Urea + Nitrolock	34	47	116	188 AB	3,3	4,4	12	20,2 AB
Urea + S90	34	38	154	186 AB	3,3	3,7	15	20,8 AB
Urea + Azufertil	34	54	149	194 AB	3,3	5	16	23,8 AB
Urea + Nitrolock + S90	34	51	154	161 AB	3,3	4,4	15	18,9 AB
Urea azufrada	34	54	172	206 A	3,3	5,7	17	25,1 A
Promedio	34	50	146	175	3,3	4,9	14,8	21,1
DMS	-	-	-	53,6	-	-	-	7,5
p-valor	-	0,49	0,62	0,04	-	0,22	0,48	0,04
CV (%)	-	21	24,5	14	-	21	23	16

*Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas para un Tukey con un $\alpha=0,1$. Días post siembra (DPS) por estadio: Z.22, 37 días; Z.30, 63 días; Z.33, 70 días; Z.65, 103 días.

Para analizar cómo cambia la respuesta al agregado de S, se procedió a agrupar los tratamientos según agregado de N, formando dos ambientes: uno con N suficiente y otro con N insuficiente (Figura 7).

En cuanto a las curvas de acumulación de biomasa, en ambos ambientes se logran máximos de similar magnitud, pero el sólo agregado de N no aseguró los valores más altos de biomasa, los cuales sólo se alcanzaron mediante agregados de S (Figura 7a, Figura 7b). Por lo tanto, la falta de S puede ser determinante en la acumulación de biomasa y en el potencial productivo de los cultivos. Se destaca el comportamiento de las fuentes urea azufrada (fuente de referencia de alta solubilidad) y urea + azufertil, con comportamientos similares, diferenciándose de los tratamientos que incluyen S90, logrando valores de biomasa intermedios entre urea azufrada y urea,

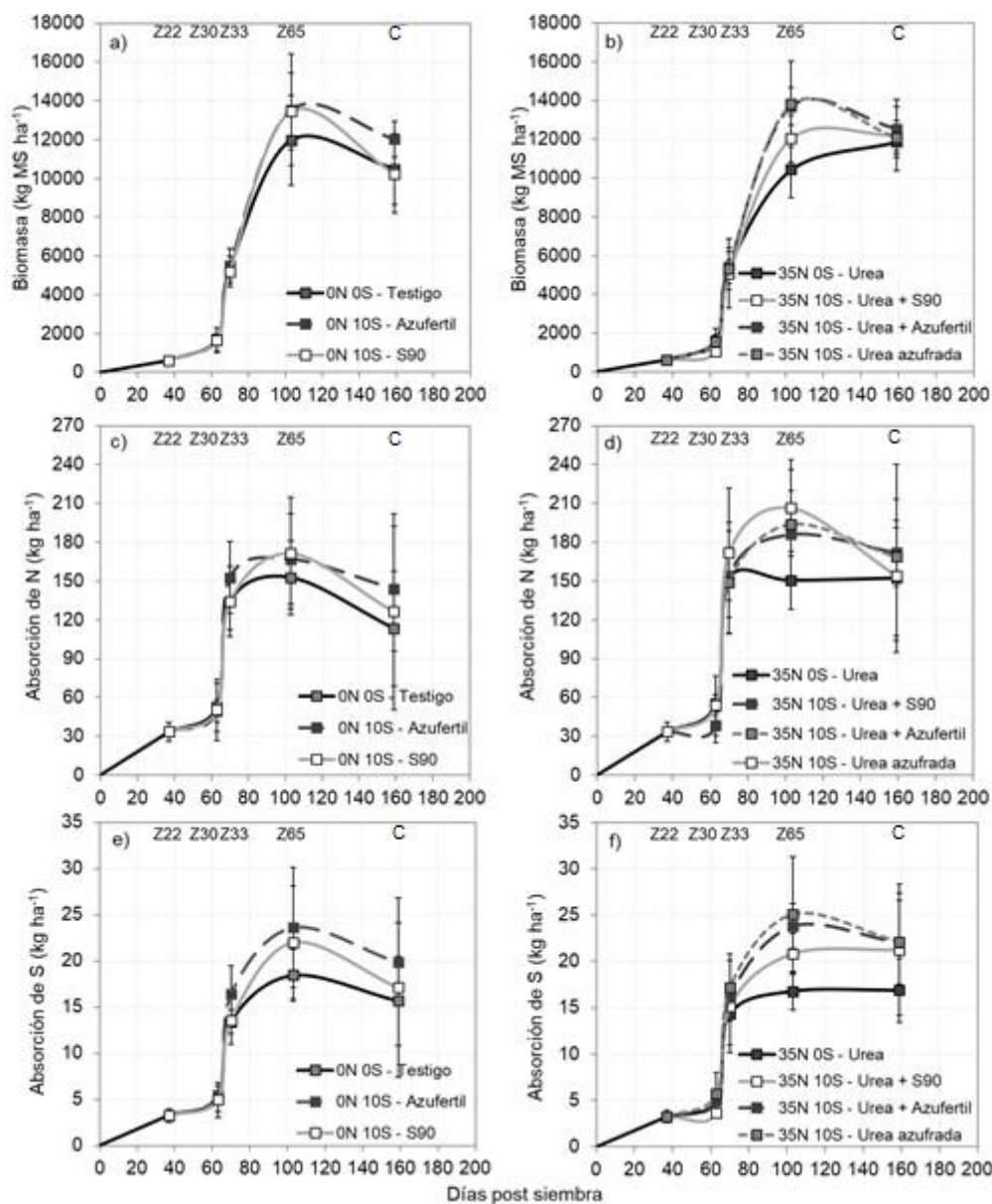
probablemente asociado a la velocidad de liberación de S propia de esta fuente (S90).

Desde Z.65 hasta cosecha la mayoría de los tratamientos perdieron N (Figura 7a y 7b). Los que presentaron mayores niveles de N absorbidos en Z.65 fueron los que más perdieron hacia final de ciclo, lo cual coincide con lo reportado por algunos autores (Kanwarpal y Waines, Bulman y Smith, citados por Cha y Durán 2001, Cha y Durán 2001, Dall' Orso et al. 2017).

Las curvas de absorción de N muestran un comportamiento similar a la biomasa, con absorciones máximas promedio oscilando entre 150 y 180 kg ha⁻¹ en Z.65, sin aparentes grandes diferencias. Se destaca urea azufrada alcanzando un valor máximo promedio de 210 kg ha⁻¹ en el mismo estadio. Es de destacar que el sólo agregado de N tampoco maximizó la absorción de N, lo cual si se logró al agregar N y S en conjunto, lo que evidencia su interacción. Por lo tanto, en ambientes sin limitantes de N, el agregado de S determinó una mayor acumulación de N (Figura 7c, Figura 7d, Cuadro 4).

En tanto a las curvas de absorción de S, las fuentes azufradas fueron aplicadas en Z.22 y las diferencias se observaron a partir de Z.65 (66 días después), destacándose urea azufrada, con un comportamiento similar a urea + azufertil (Cuadro 4). En esta variable, la fuente S90 vuelve a repetir un comportamiento intermedio respecto a las fuentes azufradas de mayor solubilidad, volviéndose a posicionar como una fuente de S de liberación más lenta. De forma general, añadir S en Z.22 siempre determinó una mayor absorción de este nutriente. Por otro lado, agregar N por sí sólo no aumentó la absorción de S, por lo cual no existió interacción NxS en la absorción de S (Figura 7e, Figura 7f).

La absorción de N y S en Z.30 no difiere estadísticamente entre tratamientos, por lo que las diferencias fueron dadas por la absorción posterior a Z.30, hasta el máximo en Z.65 (Cuadro 5). Según IPNI (2016), un cultivo de trigo absorbe 30 kg ha⁻¹ de N y 5 kg ha⁻¹ de S por cada tonelada de grano que produce, por lo cual en este ensayo hubo niveles de absorción de N y S para obtener rendimientos en el entorno de 4500 kg ha⁻¹.



Las barras indican intervalo de confianza con un $\alpha=0,05$. a) Acumulación de biomasa durante el ciclo de cultivo, en un ambiente sin N a Z.22; b) Acumulación de biomasa durante el ciclo de cultivo, en un ambiente con N suficiente a Z.22; c) Absorción de N durante el ciclo de cultivo, sin N a Z.22; d) Absorción de N durante el ciclo de cultivo, con N suficiente a Z.22; e) Acumulación de S durante el ciclo de cultivo, en un ambiente sin N a Z.22; f) Acumulación de S durante el ciclo de cultivo, en un ambiente con N suficiente a Z.22.

Figura 7. Acumulación de biomasa y absorción de N y S en función de los días post siembra en dos ambientes, con y sin N agregado a Z.22

A los efectos de realizar la comparación entre tratamientos de las tasas de crecimiento y las tasas de absorción de N y S (TAS), se tomó como referencia el período transcurrido entre los estadios Z.30 (estadio en el cual se realiza la última aplicación de fertilizante) y Z.65 (momento donde ocurre la máxima acumulación de biomasa, N y S, Cuadro 5).

El agregado de S a Z.22 aumentó la TC, TAN y TAS entre Z.30 y Z.65, lo que evidencia una interacción NxS, ya que agregar S se logró una mayor TAN, aunque las diferencias no son estadísticamente significativas. El tratamiento con urea azufrada siempre tuvo un mayor desempeño obteniendo valores mayores en cuanto a TC, TAN y TAS, con diferencias estadísticas respecto a urea. Por el otro lado, la urea siempre se ubicó como el tratamiento con menor TC, TAN y TAS (Cuadro 4).

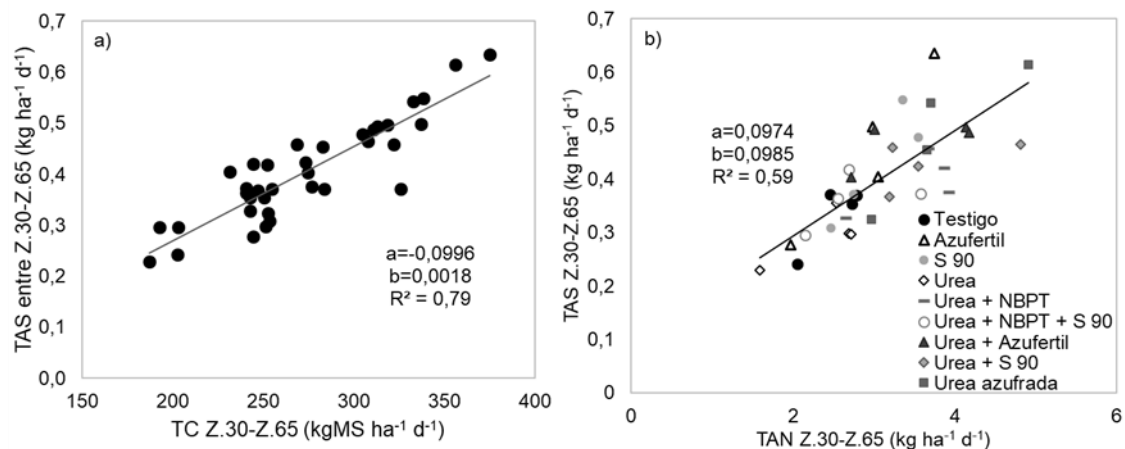
Para el período en estudio, las diferencias observadas en TC, TAN y TAS, posicionan a todos los tratamientos con aportes de S con un buen comportamiento, destacándose para todas las variables la fuente urea azufrada. De todos modos, los factores climáticos como alta temperatura y baja radiación durante los procesos macollaje y encañazón, hasta inicio de floración, no promovieron un mayor crecimiento del cultivo.

Cuadro 5. Tasas de crecimiento, absorción de N y absorción de S entre Z.22 y Z.65

Tratamientos	TC Z.30-Z.65 (kg MS ha ⁻¹ d ⁻¹)	TAN Z.30-Z.65 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	TAS Z.30-Z.65 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)
Testigo	256,5 AB	1,48 B	0,18 AB
Azufertil	297,1 AB	1,62 AB	0,23 AB
S90	295,2 AB	1,67 AB	0,21 AB
Urea	220,5 B	1,46 B	0,16 B
Urea + Nitrolock	271,5 AB	1,83 AB	0,2 AB
Urea + S90	234,1 AB	1,56 AB	0,18 AB
Urea + Azufertil	304,3 A	1,88 AB	0,23 AB
Urea + Nitrolock + S90	274,2 AB	1,81 AB	0,2 AB
Urea azufrada	306 A	2,0 A	0,24 A
Promedio	273,2	1,7	0,2
p-valor	0,022	0,042	0,035
CV (%)	13,43	14,12	16,44

Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas para un Tukey con un $\alpha=0,1$. TAN (tasa de absorción de nitrógeno); TAS (tasa de absorción de azufre).

La absorción de N y S están ambas vinculadas a la producción de biomasa, y por lo tanto, también están relacionadas entre sí. Por lo cual, de forma general para este ensayo, se puede afirmar que entre Z.30 y Z.65 se absorbieron 0,18 kg de S por cada 100 kg MS ha⁻¹ y 9,85 kg de S por cada 100 kg de N, con un R² de 0,79 y 0,59, respectivamente (Figura 8a, Figura 8b).



a) Relación entre la tasa de absorción de S y tasa de crecimiento del cultivo entre Z.30 y Z.65; b) relación entre la tasa de absorción de S y la tasa de absorción de N entre Z.30 y Z.65.

Figura 8. Tasa de absorción de S en función de la tasa de crecimiento del cultivo y la tasa de absorción de N entre Z.30 y Z.65 por tratamiento

Al analizar la RAS a Z.65 desglosada por tratamiento, se obtienen resultados no concluyentes debido a la alta variación de los datos y a que no presentan diferencias estadísticas entre sí. No obstante, y a pesar de no presentar diferencias estadísticas, azufertil, urea + azufertil y urea azufrada presentaron valores por encima del promedio, que pueden deberse a la alta solubilidad de los nutrientes de dichas fuentes, y posicionan a azufertil como una fuente similar a urea azufrada en cuanto al aporte de S (Cuadro 6). En esta oportunidad S 90 y urea + S90 obtuvieron una RAS por debajo del promedio, lo cual puede atribuirse a una velocidad de entrega de los nutrientes menor por parte de S90, realizando un mayor aporte de S al sistema.

Cuadro 6. RAS discriminada por tratamiento aplicado a Z.22

Tratamientos	RAS Z.65 (%)
Testigo	-
Azufertil	52
S 90	36
Urea*	-
Urea + Nitrolock*	-
Urea + S 90	13
Urea + Azufertil	53
Urea + Nitrolock + S 90	23
Urea azufrada	66
Promedio	39
p-valor	0,42
CV (%)	112

*No se presentan datos de RAS para estas fuentes debido a que no contienen S.

Como indicador para caracterizar la velocidad de entrega de S de cada fuente, se utilizó la relación de S absorbido en Z.30 respecto al máximo en Z.65. Se diferenció estadísticamente la urea, con un 30% del S absorbido en Z.30, de urea + S90, con un 18%.

Estos resultados sugieren que existen diferencias entre fuentes, dadas por sus características propias (y en interacción con el ambiente) como por ejemplo composición, solubilidad de los nutrientes y velocidad de liberación que hacen que la dinámica en el cultivo sea diferente. Específicamente, S90 vuelve a posicionarse como una fuente de S de liberación lenta, comportamiento que está previsto en la ficha técnica del producto en cuanto a que específicamente se lo describe como una fuente de S de liberación gradual. Si bien no hubieron diferencias estadísticas, los tratamientos que incluyeron azufertil presentaron tasas medias de absorción similares a urea azufrada.

Cuadro 7. Máximo S absorbido a Z.65, tasa media de absorción al máximo, N absorbido a Z.30 y relación entre absorción a Z.30 y Z.65

Tratamientos	Tasa media de absorción al máximo (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	Relación S Z.30/Z.65*
Testigo	0,18 AB	0,28 AB
Azufertil	0,23 AB	0,24 AB
S 90	0,21 AB	0,22 AB
Urea	0,16 B	0,3 A
Urea + Nitrolock	0,20 AB	0,22 AB
Urea + S 90	0,20 AB	0,18 B
Urea + Azufertil	0,23 AB	0,21 AB
Urea + Nitrolock + S 90	0,18 AB	0,23 AB
Urea azufrada	0,24 A	0,23 AB
Promedio	0,20	0,23 AB
p-valor	0,04	0,04
CV (%)	16,4	20,3

*Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas para un Tukey con un $\alpha=0,1$.

4.3.3. Relación N:S

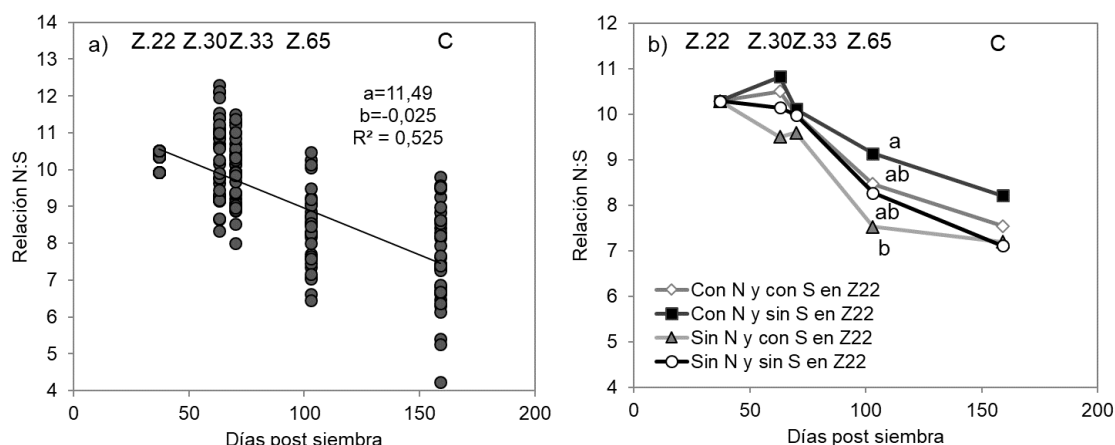
La concentración de N y S en la biomasa aérea decrece a medida que el cultivo crece durante el avance del ciclo del cultivo, en una curva del tipo alométrica entre cada nutriente y la biomasa acumulada (Justes et al. 1994, Reussi et al. 2012, Fassana et al. 2017). No obstante, debido a que primero se absorbe el N, y posteriormente y levemente retrasado el S, la relación N:S disminuye a medida que avanza el ciclo del cultivo (Reussi et al., 2006). En este trabajo hubo una relación significativa entre la relación N:S del cultivo y los DPS, con una disminución de 0,25 puntos porcentuales por cada 10 DPS (R^2 : 0,53).

Al estudiar los tratamientos agrupados según agregado de N y S en Z.22, se observa la misma tendencia general de disminución en la relación N:S, con aparentes diferencias (aunque no siempre significativas) entre grupos. Se destaca que el grupo con N y sin S se encuentra siempre con una relación N:S mayor, y que el grupo sin N y con S siempre con una relación menor, siendo estadísticamente distintos sólo en Z.65 (Figura 9b), lo cual refleja la relación N:S del fertilizante en la relación N:S en la biomasa aérea.

Analizando fuente por fuente (Figura 9c, Figura 9d, Cuadro 8) se observa que el tratamiento con urea tiene siempre una relación N:S más alta (sólo aporta N), y es distinto estadísticamente respecto a urea azufrada y

azufertil, por efecto del aporte de azufre de rápida liberación que hacen ambas fuentes. Es de destacar el caso de urea azufrada ya que también aporta N y de todas maneras logra disminuir la relación N:S, seguramente asociado a la alta solubilidad del S proveniente del sulfato de amonio. La fuente S 90 se posiciona con un comportamiento intermedio, lo cual concuerda con la bibliografía en cuanto a su menor velocidad de aporte de S. Posteriormente, en Z.65 vuelve a presentarse azufertil como la fuente que logra una menor relación N:S en planta. Éstas diferencias en la relación N:S puede asociarse a diferencias en la velocidad de aporte de los nutrientes entre las fuentes en estudio.

No hubo efecto de la utilización del aditivo Nitrolock en la relación N:S absorbido por el cultivo, al compararlo con sus tratamientos homólogos se obtienen valores de relación N:S similares.



a) Relación N:S en función de los días post siembra; b) Relación N:S en función de los días post siembra y agregado de N y S en Z.22.

Figura 9. Relación N:S de la biomasa aérea del cultivo en función del ciclo del cultivo

Cuadro 8. Relación N:S por estadio para cada fuente en estudio

Tratamientos N y S a Z.22	Relación N:S (%)		
	Z.30	Z.33	Z.65
Testigo (0N 0 S)	10,2 ABCD	10,0	8,3 AB
Azufertil (0N 10S)	9,1 A	9,3	7,2 A
S90 (0N 10S)	9,9 ABC	9,9	7,9 AB
Urea (35N 0S)	11,1 CD	10,6	9 B
Urea + Nitrolock (35N 0 S)	10,6 BCD	9,7	9,3 B
Urea + S90 (35N + 10S)	11CD	10,5	8,5 AB
Urea + Azufertil (35N + 10S)	10,7 BCD	9,3	8,1 AB
Urea + Nitrolock + S90 (35N 10S)	10,4 ABCD	10,3	8,9 B
Urea azufrada (35N 10S)	9,3 AB	10,0	8,3 AB
Promedio	10,3	9,9	8,4
p-valor	0,0005	0,08	0,01
CV (%)	6,69	6,58	8,48

*Letras diferentes indican medias estadísticamente distintas para un Tukey con un $\alpha=0,05$.

Las características climáticas del año, desfavorables para los cultivos de invierno, limitaron el desarrollo del cultivo y también el rendimiento en grano, lo cual, sumado a un suelo con elevada capacidad de aporte de nutrientes (18 kg S ha⁻¹ absorbidos por el testigo sin aplicación de fertilizante azufrado), no permitieron la expresión del potencial del cultivo y los tratamientos. Además, existieron otras limitantes que limitan la interpretación de los resultados, como el hecho de no contar con datos reales de N y S en grano, y un alto CV para alguna de las variables estudiadas.

En este contexto particular, la máxima absorción de S se logró a Z.65 con un promedio de 21 kg S ha⁻¹, con diferencias entre fuentes, donde la urea azufrada (testigo tecnológico de referencia) logró los máximos valores (25 kg S ha⁻¹), mostrando la urea + azufertil un comportamiento muy similar (24 kg S ha⁻¹). El tratamiento urea + S90, si bien no se diferenció estadísticamente, mostró

un desempeño intermedio, con menores niveles de S absorbido en ese momento (17,1 % menos que el testigo tecnológico, urea azufrada).

Las diferencias tanto en biomasa, absorción de N y de S, se expresaron a Z.65 (66 días luego de aplicadas los tratamientos en Z.22). La máxima acumulación de biomasa se logró sólo mediante agregados de S (con o sin N), destacándose nuevamente los tratamientos urea azufrada (13807 kg MS ha⁻¹) y urea + azufertil (13693 kg MS ha⁻¹), con comportamientos similares.

Las absorciones de N alcanzadas a Z.65 se encontraron entre 153 y 206 kg N ha⁻¹, valores con los cuales se pudieron haber alcanzado rendimientos superiores, pero que posiblemente debido al efecto año no pudieron expresarse en rendimiento en grano. Las diferencias entre tratamientos se marcaron a Z.65, nuevamente urea azufrada, el tratamiento testigo tecnológico, fue el que alcanzó mayores niveles (206 kg N ha⁻¹), seguido por urea + azufertil (194 kg N ha⁻¹) y luego urea + Nitrolock (188 kg N ha⁻¹) y urea + S90 (186 kg N ha⁻¹).

En cuanto a la velocidad de liberación de S, medida como la tasa media de absorción al máximo y la proporción de S absorbido en Z.30/Z.65 ratifican los resultados anteriormente obtenidos, los cuales posicionan a urea + azufertil como un tratamiento similar al testigo tecnológico urea azufrada, como fuentes de alta velocidad de liberación de S disponible para el cultivo. Distinto fue el desempeño de S90, que muestra un comportamiento de liberación gradual, lo cual coincide con los antecedentes.

A pesar de que las condiciones fueron desfavorables para los cultivos de invierno, las altas precipitaciones y alta temperatura que procedieron a la aplicación de los tratamientos generaron expectativa en las fuentes que incluían los inhibidores. No obstante, no lograron un desempeño diferencial respecto a sus tratamientos homólogos sin inhibidores, en este ensayo.

5. CONCLUSIONES

Es importante destacar que las conclusiones de este trabajo son válidas para un contexto particular, dado por el efecto año desfavorable y características del suelo de elevada capacidad de aporte de N y S. Las condiciones climáticas del año no fueron favorables para que se expresara el potencial de rendimiento, siendo afectado por altas temperaturas y abundantes precipitaciones ocurridas entre agosto y setiembre, condicionando los resultados obtenidos.

La acumulación de biomasa de los distintos tratamientos fue similar con y sin N limitante, presentando diferencias estadísticas entre fuentes a Z.65, con valores máximos muy similares. Las mayores acumulaciones de biomasa sólo se lograron mediante adiciones de S, destacándose en particular los desempeños de urea azufrada y urea + azufertil.

La cantidad de N y S absorbido alcanzó distintos niveles en función de la fuente de fertilizante utilizada, con valores máximos de absorción de N y S cercanos a 200 y 25 kg ha⁻¹, respectivamente. No bastó con sólo agregar N para alcanzar la máxima absorción de este nutriente, sino que fue necesario fertilizar con N y S, mostrando una interacción positiva entre ellos. Por lo tanto, se acepta la primera hipótesis de este trabajo, ya que las fuentes evaluadas condicionaron las cantidades de N y S absorbidos por el cultivo.

Hubo diferencias entre fuentes de fertilizante en TC, TAN y TAS entre Z.30 y Z.65, se destaca el comportamiento de urea azufrada, ubicándose siempre como el tratamiento con mayores TC, TAN y TAS. En particular, las diferencias obtenidas en las TAS, posicionan a urea azufrada y urea + azufertil como fuentes de rápida liberación. En cuanto a S90, mostró un comportamiento intermedio de liberación más lenta de nutrientes para el cultivo. Por lo que se acepta la segunda hipótesis de este trabajo, debido a que las distintas fuentes condicionaron la tasa de absorción tanto de N como de S.

En lo referido a la relación N:S, esta descende de forma general a medida que avanza el ciclo del cultivo. En particular, se diferenciaron de acuerdo al contenido de N y/o S de los fertilizantes. Las fuentes que sólo contienen N, elevaron la relación N:S, las fuentes que sólo tenían S, la disminuyeron, y las fuentes mixtas mostraron comportamientos intermedios. Las distintas fuentes utilizadas tuvieron incidencia en la relación N:S del cultivo. Por lo tanto, también se acepta la tercera hipótesis, debido a que las fuentes evaluadas en este ensayo condicionaron la relación N:S del cultivo.

6. RESUMEN

La historia agrícola reciente del Uruguay, con ausencia de rotación de pasturas, alta proporción de soja y bajo aporte de S con la fertilización empleada, ha llevado a un aumento en la frecuencia de sitios con respuesta al agregado de S, limitando la concreción de altos rendimientos. Como hipótesis de trabajo se plantea que las diferencias entre las fuentes nitrógeno – azufradas disponibles condicionan la cantidad, tasa y relación de N:S absorbidos por un cultivo de trigo a nivel de campo. El experimento se instaló en la Facultad de Agronomía. EEMAC (Estación Experimental “Mario A. Cassinoni”), departamento de Paysandú, en el año 2017, utilizando el cultivar de trigo DM Ceibo. El ensayo consistió en un diseño de bloques completos al azar, con 4 repeticiones. Las fuentes de variación se introdujeron en Z.22, con 9 tratamientos que incluyeron un testigo sin fertilizar. Las dosis de N fueron ajustadas según el modelo de Facultad de Agronomía, y se ajustó el S para lograr una relación N:S de 3,5:1. En Z.30 todo fue corregido con 50 kg de N por ha (urea). Se midió biomasa, %N y %S en Z.22, Z.30, Z.33, Z.65 y a cosecha. El rendimiento máximo fue en promedio 4276 kg ha⁻¹ y se logró con urea + azufertil (N y S). El testigo sin fertilizar en Z.22, alcanzó 3642 kg ha⁻¹. Hasta Z.65 no existieron diferencias entre los distintos tratamientos para ninguna de las variables analizadas. La absorción de N en Z.65 fue de 175 kg ha⁻¹, registrándose en promedio pérdidas entre Z.65 y cosecha de 30 kg de N por ha. La TC entre Z.30 y Z.65 estuvo estrechamente relacionada con la TAS para el mismo período (R^2 : 0,79). El agregado de N mejoró la RAS promedio (44% sin N vs. 55% con N). La máxima cantidad de S absorbido se obtuvo en Z.65 con urea azufrada, con 25,1 kg de S por ha. Las diferencias obtenidas, acumulación de biomasa y rendimiento en grano, no fueron significativas, pero sí hubo diferencias en la absorción de N y S, y la velocidad de aporte de S de cada fuente, que se vio reflejada en la relación N:S del cultivo. Queda la interrogante de qué sucedería en un año de mayor potencial o en un ambiente con menor capacidad de aporte de N.

Palabras clave: Nitrógeno; Azufre; Trigo; RAS; Absorción de nutrientes.

7. SUMMARY

In the recent history of Uruguay, without pastures rotations, in addition with high proportion of soybean crops, and the low addition of sulphur with the fertilizers used, this has led to an increase of sites with response to the addition of sulphur, limiting the concretion of higher yields. Based on this, the hypothesis of this work propose that the differences between different nitrogen – sulphur fertilizers sources condition the quantity, rate and N:S relationship absorbed by a field wheat crop. The experiment was installed in the Agronomy Faculty. EEMAC (Estación Experimental “Mario A. Cassinoni”), Paysandú department, in 2017, using a wheat cultivar called DM Ceibo. The experiment consisted of a complete random block design, with 4 repetitions. The sources of variation were introduced in Z.22, with 9 treatments which included a witness without fertilization. The rates of N were adjusted by fertilization model of Agronomy University, and the S rate was adjusted to obtain a N:S relationship of 3,5:1. In Z.30 all the treatments were corrected with 50 kg of N per hectare (urea). Biomass, %N and %S were measured at Z.22, Z.30, Z.33, Z.65 and PM. The maximum yield was 4276 kg ha⁻¹ in average, and was obtained with urea + azufertil (N and S). The witness without fertilization in Z.22, reached 3642 kg ha⁻¹. Until Z.65 there were no differences between different treatment for any of the variables analysed. The N absorption at Z.65 was 175 kg ha⁻¹, registering falls of 30 kg ha⁻¹ in average between Z.65 and harvest. The GR between Z.30 and Z.65 was tightly related with ARS for the same period (R²: 0,79). The N addition did improve the average RAS (44% without N vs. 55% with N). The maximum quantity of S absorbed was obtained with sulphur urea in Z.65, with 25,1 kg of S per hectare. The differences between biomass accumulation, and grain yield, were not significantly, but there were differences in N and S absorption, and release rate of S between sources, that was reflected in the N:S relationship of the crop. Thus, the question is what would happen in a different environment or with reduced soil N capacity, scenario increasingly common in Uruguay.

Keywords: Nitrogen; Sulphur; Wheat; ARS; Absorption of nutrients.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, G.; Lefroy, R.; Chinoim, N.; Blair, G. 1992. Soil sulphur testing. *Sulphur in Agriculture*. 16:6-14.
2. Archer, M. J. 1974. A sand cultura experiment to compare the effects of sulphur on five wheat cultivars (*T. aestivum* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*. 25:369-380.
3. Bruulsema, T. W.; Fixen, P.; Sulewsky, G. 2013. 4R de la nutrición de plantas: un manual para mejorar el manejo de los nutrientes de plantas. Buenos Aires, International Plant Nutrition Institute (IPNI). 140 p.
4. Burke, J. J.; Holloway, P.; Dalling, M. J. 1986. The effect of sulphur deficiency on the organisation and photosynthetic capability of wheat leaves. *Journal of Plant Phisiology*. 125:371-375.
5. Campbell, W. H. 1999. Nitrate reductase structure, function and regulation: bridging the gap between biochemistry and physiology. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 50:277-303.
6. Carciochi, W. D.; Wyngaard, N.; Divito, G. A.; Reussi Calvo, N. I.; Cabrera, M. L.; Echeverría, H. E. 2016. Diagnosis of sulfur availability for corn base on soil analysis. *Biology and Fertility of Soils*. 52:917-926.
7. _____; Wyngaard, N.; Divito, G. A.; Cabrera, M. L.; Reussi Calvo, N. I.; Echeverría, H. E. 2018. A comparison of indexes to estimate corn S uptake and S mineralization in the field. *Biology and Fertility of Soils*. 54:349-362.
8. Cha, G.; Durán, J. M. 2001. Respuesta al agregado de nitrógeno tardío (Z 3.0 y Z 4.7) en rendimiento y calidad de trigo (*Triticum aestivum*). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 90 p.
9. Dall'Orso, J.; Fernández, E.; Uría, P. 2016. Dinámica de aporte de N y S de distintas fuentes de fertilizantes disponibles actualmente en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 72 p.

10. De Bona, F. D.; Fedoseyenko, D.; Von Wirén, N., Monteiro, F. A. 2011. Nitrogen utilization by sulfur-deficient barley plants depends on the nitrogen form. *Environmental and Experimental Botany*. 74:237-244.
11. De Vos, N. M. 1979. Cultivar differences in plant and crop photosynthesis. *In*: Spiertz, J. H. J.; Kramer, T. eds. *Crop Physiology and Cereal Breeding*. Wageningen, Pudoc. pp. 71-74.
12. Echeverría, H. E.; San Martín, N. F.; Bergonzi, R. 1996. Mineralización de azufre y su relación con la de nitrógeno en suelos agrícolas. *Ciencia del Suelo*. 14:107-109.
13. _____. 2005. Azufre. *In*: Echeverría, H. E.; García, F. O. eds. *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Buenos Aires, INTA. pp. 139-160.
14. Ercoli, L.; Lulli, L.; Arduini, I.; Mariotti, M.; Masoni, A. 2011. Durum wheat grain yield and quality as affected by S rate under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*. 35:63-70.
15. _____.; Arduini, I.; Mariotti, M.; Lulli, L.; Masoni, A. 2012. Management of sulphur fertilizer to improve durum wheat production and minimise S leaching. *European Journal of Agronomy*. 38:74-82.
16. 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. *IPNI. Informaciones Agronómicas*. no. 45:22-26.
17. _____.; Kemanian, A.; Mazzilli, S.; Cadenazzi, M.; Dogliotti, S. 2016. Depressed attainable wheat yields under continuous annuals no-till agricultura suggest declining soil productivity. *Fields Crop Research*. 186:107-116.
18. Fassana, C.; Hoffman, E.; Berger, A.; Ernst, O. 2017. Nutrición del cultivo de trigo: criterios para el manejo de la fertilización nitrogenada a Z 33. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (5°, 2017, Paysandú). *Al futuro, no se alcanza con llegar*. Paysandú, Hemisferio Sur. pp. 91-99.

19. Ferreira, G.; Ernst, O. 2014a. Diagnóstico del estado nutricional del cultivo de colza (*Brassica napus*) en base a curvas de dilución de nitrógeno y azufre. *Agrociencia* (Uruguay). 18 (1):75-85.
20. _____. 2014b. Diagnóstico 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.
21. Fischer, R. A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science*. 105:447-461.
22. Flaetea, N. E. S.; Hollung, K.; Ruud, L.; Sogn, T.; Færgestad, E. M.; Skarpeid, H. J.; Magnus, E. M.; Uhlen, A. K. 2005. Combined nitrogen and sulfur fertilisation and its effect on wheat quality and protein composition measured by SE-FPLC and proteomics. *Journal of Cereal Science*. 41:357-359.
23. Fontanetto, H.; Keller, O.; Belotti, L.; Negro, C.; Giailevra, D. 2010. Efecto de diferentes combinaciones de nitrógeno y azufre sobre el cultivo de sorgo granífero (campaña 2008/09). *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 46:21-23.
24. García, F. O. 2004. Reacciones de los fertilizantes nitrogenados en el suelo. Buenos Aires, AR, INPOFOS Cono Sur. 5 p.
25. _____.; Salvagliotti, F. 2009. Nutrient use efficiency of cropping systems in the southern cone of Latin America. *In*: Symposium Nutrient Use Efficiency (18th., 2009, San José, Costa Rica). Proceedings. Buenos Aires, IPNI. pp. 35-46.
26. _____. 2013. La agricultura en el cono Sur ¿qué sabemos, qué debemos conocer? *In*: Simposio Nacional de Agricultura (3º., 2013, Paysandú). No se llega si no se sabe a dónde ir. Paysandú, Uruguay, Hemisferio Sur. pp. 3-17.
27. García Lamothe, A. 2002. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo pan. (en línea). Montevideo, INIA. s.p. Consultado oct. 2019. Disponible en http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/s_trigo.pdf

28. _____.; Quincke, A. 2011. El azufre en cereales de invierno: resumen de resultados experimentales y repaso de la teoría. In: Jornada de Divulgación (2011, Durazno, UY). Aportes a la zafra de cultivos de invierno. Montevideo, INIA. pp. 33-36 (Actividades de Difusión no. 646).
29. Ghani, A.; McLaren, R. G.; Swift, R. S. 1993. Mobilization of recently formed soil organic sulphur. *Soil Biology and Biochemistry*. 25:1739-1744.
30. Gilbert, S. M.; Clarkson, D. T.; Cambridge, M.; Lambers, H.; Hawkesford; M. J. 1997. SO₄²⁻ deprivation has an early effect on the content of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and photosynthesis in young leaves of wheat. *Plant Physiology*. 115:1231-1239.
31. González, I.; Trujillo, A. 1995. Caracterización de la fenología y el llenado de grano en 8 variedades de cebada cervecera para la calibración y validación del modelo de simulación CERES-Barley. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 127 p.
32. Haneklaus, S.; Bloem, E.; Schnug, E. 2007. Sulfur interactions in crop ecosystems. In: Hawkesford, M. J.; Kok, J. L. eds. *Sulfur in plants: an ecological perspective*. Dordrecht, Springer. cap. 2, pp. 17-58.
33. Hoffman, E.; Ernst, O. 2008. Diagnóstico del manejo de la fertilización en cultivos de secano en Uruguay. *Cangüé*. no. 30:9-17.
34. _____.; Viega, L.; Cadenazzi, M.; Gestido, V.; Mesa, P.; Fernández, R.; Baeten, A.; Glison, N. 2009. Bases morfo-fisiológicas que justifican el manejo diferencial de cultivares de trigo y cebada en Uruguay. *IPNI. Informaciones Agronómicas*. no. 45:8-15.
35. _____.; Perdomo, C.; Ernst, O.; Bordolli, M.; Pastorini, M.; Pons, C.; Borghi, E. 2010. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. *IPNI. Informaciones Agronómicas*. no. 46:13-18.

36. _____.; Fassana, N.; Perdomo, C. 2013. Manejo de nutrientes: cambios que genera la intensificación, manejo de nitrógeno en cereales de invierno. ¿Agregando más nos estamos quedando cortos? In: Simposio Nacional de Agricultura (3°, 2013, Paysandú, UY). No se llega si no se sabe a dónde ir: pensar en las causas y no sólo medir las consecuencias. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 33-44.
37. _____.; _____.; Mazzilli, S.; Berger, A.; Ernst, O. 2015. Eficiencia en el uso de los factores de producción: la productividad parcial de los nutrientes. La necesidad de incrementar la eficiencia del uso del nitrógeno. In: Simposio Nacional de Agricultura (4°, 2015, Paysandú, UY). Buscando el camino para la intensificación sostenible para la agricultura. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 131-140.
38. _____.; _____.; Akerman, A.; Bonansea, S.; Van del Dorpell, M. 2018. Caracterización de cultivares de trigo. Paysandú, UY, Facultad de Agronomía. EEMAC. 19 p.
39. INIA; INASE (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY; Instituto Nacional de Semillas, UY). 2020. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de trigo de ciclo intermedio: período 2019. Montevideo. 51 p.
40. IPNI (International Plant Nutrition Institute, CA). s.f. Azufre. (en línea). IPNI. Fuentes de Nutrientes Específicas no. 13. s.p. Consultado 17 jun. 2020. Disponible en [https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/4E2EBCDC9EF89E6785257BBA0059C3B0/\\$FILE/NSS-ES-13.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/4E2EBCDC9EF89E6785257BBA0059C3B0/$FILE/NSS-ES-13.pdf)
41. Jamal, A.; Moon, Y-S.; Abdin, M. Z. 2010. Sulphur a general overview and interaction with nitrogen. Australian Journal of Crop Science. 4 (7):523-529.
42. Justes, E.; Mary, B.; Meynard, J.; Machet, J.; Thelier-Huches, L. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. Annals of Botany. 74:397-407.

43. Lerner, S. E.; Seghezzo, M. L.; Molfese, R. E.; Ponzio, N. R.; Cogliatti, M.; Rogers, W. J. 2006. N- and S- fertilizer effects on grain composition, industrial quality and-use in durum wheat. *Journal of Cereal Science*. 44:2-11.
44. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1979. Índices de productividad grupos CONEAT. Montevideo. 167 p.
45. Martino, D. L.; Ponce de León, F. 1999. Canola: una alternativa promisorio. Montevideo. INIA. 99 p. (Serie Técnica no. 105).
46. Mazzilli, S. 2004. Efecto de la dosis de nitrógeno y fuentes alternativas a la urea sobre la absorción, crecimiento y rendimiento en grano en trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 68 p.
47. _____.; Hoffman, E. 2010. Respuesta a la fertilización con azufre en el cultivo de colza-canola en suelos del litoral Norte de Uruguay. IPNI. *Informaciones Agronómicas*. no. 46:18-21.
48. Melgar, R.; Gearhart Honeywell, M. 2006. Manejo del azufre y fertilizantes azufrados en siembra directa. (en línea). Buenos Aires, INTA. s.p. Consultado 20 abr. 2020. Disponible en <http://www.fertilizando.com>
49. Melsted, S. W.; Motto, H. L.; Peck, T. P. 1969. Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data. *Agronomy Journal*. 61:17-20.
50. Mendel, R. 1997. Molybdenum cofactor of higher plants: biosynthesis and molecular biology. *Planta*. 203:399-405.
51. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2018. Anuario estadístico agropecuario 2018. (en línea). Montevideo. 211 p. Consultado 22 abr. 2020. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones>

52. Monaghan, J. M.; Scrimgeour, C. M.; Stein, W. M.; 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.
53. Morón, A. 1996. 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).
54. _____. 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).
55. Pagani, A.; Echeverría, H. 2011. Evaluación de métodos de diagnóstico de azufre en maíz: indicadores de suelo e indicadores vegetales. Utilidad del medidor de clorofila. IPNI. *Informaciones Agronómicas*. no. 2:38-45.
56. Perdomo, C.; Bordoli, J. M. 1999a. Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo y su relación con el contenido de proteína en grano. In: Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1º., 1999, Mercedes, UY). Resúmenes. Montevideo, Mesa Nacional de Trigo. s.p.
57. _____.; Barbazán, M. 1999b. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 72 p.
58. Pinkerton, A. 1998. Critical sulfur concentrations in oilseed rape (*Brassica napus*) in relation to nitrogen supply and to plant age. *Australian Journal of Agricultural Research*. 32:203-212.
59. Pyrstupa, P.; Bergh, R.; Ferraris, G.; Loewy, T.; Gutiérrez Boem, F.; Ventimiglia, L. 2007. Fertilización nitrogenada y azufrada en cebada cervecera cv. Scarlett. IPNI. *Informaciones Agronómicas*. no. 38:5-11.
60. Randall, P. J.; Spencer, K.; Freney, R. 1981. Sulfur and nitrogen fertilization effects on wheat. I. Concentration of sulfur and the nitrogen sulfur ratio in grain, in relation to the yield response. *Australian Journal of Agricultural Research*. 32:203-212.

61. Rasmussen, P. E.; Ramig, R. E.; Allmaras, R. R.; Smith, C. M. 1975. Nitrogen-sulfur relations in soft white winter wheat. II. Initial and residual effects of sulfur application on nutrient concentration, uptake, and N/S ratio. *Agronomy Journal*. 67:224-228.
62. _____.; Kresge, P. O. 1986. Plant response to sulfur in the Western United States. In: Tabatabai, M. A. ed. *Sulfur in Agriculture*, Madison, Wisconsin, ASA/CSSA/SSSA. pp. 357-374 (Agronomy Monograph no. 27).
63. Reussi Calvo, N.; Echevarría, H.; Sainz Rosas, H. 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el Sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 24 (1):77-87.
64. _____.; _____.; _____. 2011. Diagnosing sulfur deficiency in spring red wheat: plant analysis. *Journal of Plant Nutrition*. 34:573-589.
65. _____.; _____.; _____. 2012. Stability of foliar nitrogen: sulphur ratio in spring red wheat and sulfur dilution curve. *Journal of Plant Nutrition*. 35:990-1003.
66. Reneau Jr.; Bran, D. E.; Donohue, S. J. 1986. Effect of sulphur on winter wheat grown in the Coastal Plain of Virginia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 17:149-158.
67. Salvaghiotti, F.; Gerster, G.; Bacigalupo, S.; Castellarín, J.; Galarza, C.; González, N.; Gudelj, V.; Novello, O.; Pedrol, H.; Vallone, P. 2004. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo*. 22 (2):92-101.
68. _____.; Miralles, D. J. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy*. 28:282-290.
69. _____.; Castellarín, J. M.; Miralles, D. J.; Pedrol, H. M. 2009. Sulphur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. (en línea). *Crops Research*. 113:170-177. Consultado 20 abr. 2020. Disponible en <http://www.elsevier.com/locate/fcr>

70. 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.
71. Schnug, E.; Haneklaus, S. 1998. Diagnosis of sulphur nutrition. In: Schnug, E. ed. *Sulphur in agroecosystems*. Dordrecht. Kluwer. pp. 1-38.
72. Siri, G.; Ernst, O. 2009. Cambios en el contenido de carbono y nitrógeno del suelo: ¿hacia dónde va el sistema? In: Simposio Nacional de Agricultura (1º., 2009, Paysandú, UY). *Agricultura de secano*. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 111-123.
73. Spencer, K.; Freney, J. R. 1980. Assessing the sulphur status of field-grown wheat by plant analysis. *Agronomy Journal*. 72:469-472.
74. Steinbach, H. S.; Álvarez, R. 2014. Eficiencia de respuesta de trigo, maíz y soja a la fertilización azufrada en la región pampeana argentina. *IPNI. Informaciones Agronómicas*. no. 13:11-17.
75. Swamy, U.; Wang, M.; Tripathy, J. N.; Kim, S. K.; Hirasawa, M.; Knaff, D. B.; Allen, J. P. 2005. Structure of spinach nitrite reductase: implications for multi-electron reactions by the iron-sulfur: siroheme cofactor. *Biochemistry*. 44:16054-16063.
76. Tisdale, S. L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D. 1993. *Soil fertility and fertilizer*. 5th. ed. New York, Macmillan. pp. 266-373.
77. Torres Duggan, M.; Gambaudo, S.; Quaino, O. 2006. Evaluación de fuentes azufradas en trigo en un suelo Argiudol Típico de Santa Fé, Argentina. In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (20º., 2006, Salta, Jujuy, AR). *Actas*. Buenos Aires, AACS (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo). pp. 44-48.
78. Zaroug, M.; Munns, D. 1980. Influence of phosphorus and sulphur nutrition on composition of *Clitoria ternatea* L. *Plant and Soil*. 55:251-259.
79. Zhao, F. J.; McGrath, S. P. 1994. Soil extractable sulphate and organic sulphur and their availability to plant. *Plant and Soil*. 164:143-250.

80. _____.; _____.; Crosland, A. R.; Salmon, S. E. 1995. Changes in the sulfur status of British wheat-grain in the last decade, and its geographical-distribution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 68:507-514.
81. _____.; Hawkesford, M. J.; Warrilow, A. G. S.; McGrath, S. P.; Clarkson, D. T. 1996. Responses of two wheat varieties to sulphur addition and diagnosis of sulphur deficiency. *Plant Soil*. 181:317-327.
82. _____.; _____.; McGrath, S. P. 1999. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. (en línea). *Journal of Cereal Science*. 30:1-17. Consultado 20 abr. 2020. Disponible en <http://www.idealibrary.com>
83. _____.; 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. *Journal of Cereal Science*. 43:369-377.