

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**AJUSTE DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y AZUFRA
RELACIÓN A LOS INDICADORES OBJETIVOS DE SUELO Y/O PLANTA**

por

**Santiago LÓPEZ BEROCA
Maximiliano Leonardo VEROCAI BRITOS**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2017**

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. Sebastián Ramón Mazzilli Vanzini

Ing. Agr. Esteban Martín Hoffman Berasain

Ing. Agr. Gonzalo Ramón Ferreira Donnini

Fecha: 22 de marzo de 2017

Autores: -----
Santiago López Berocay

Maximiliano Leonardo Verocai Britos

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros padres, hermanos y amigos, por el apoyo continuo a lo largo de nuestra formación.

A la empresa Kilafen por permitirnos realizar el ensayo en su campo.

Al Tec. Agropecuario Darío Fross por su ayuda en la parte práctica de nuestra tesis.

A la Lic. Sully Toledo por la corrección del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. <u>INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	2
2.2. <u>IMPORTANCIA DE LA NUTRICIÓN MINERAL EN CANOLA</u>	4
2.3. <u>NITRÓGENO</u>	6
2.3.1. <u>Importancia del nitrógeno para la producción</u>	6
2.3.2. <u>Nitrógeno en planta</u>	8
2.4. <u>AZUFRE</u>	9
2.4.1. <u>Importancia del azufre para la producción</u>	9
2.4.2. <u>Azufre en planta</u>	10
2.5. <u>INTERACCIÓN ENTRE NITRÓGENO Y AZUFRE</u>	11
2.6. <u>FRACCIONAMIENTO Y MOMENTO DE APLICACIÓN</u>	12
2.7. <u>EFICIENCIA DE USO DE LOS NUTRIENTES</u>	14
2.8. <u>CURVA DE DILUCIÓN E ÍNDICES DE ESTADO NUTRICIONAL</u>	15
2.9. <u>POTENCIAL Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO</u>	16
2.10. <u>INFLUENCIA DE LOS FACTORES AMBIENTALES</u>	17
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	19
3.1. <u>DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO</u>	19
3.1.1. <u>Tratamientos aplicados</u>	19
3.2. <u>DETERMINACIONES REALIZADAS</u>	20
3.2.1. <u>Muestreo de suelo</u>	20
3.2.2. <u>Muestreo de biomasa y rendimiento</u>	20
3.2.3. <u>Trabajo de laboratorio</u>	21
3.2.3.1. <u>Análisis de suelo</u>	21
3.2.3.2. <u>Análisis de biomasa y grano, y componentes del rendimiento</u>	21
3.3. <u>EFICIENCIA DE USO DE LOS NUTRIENTES</u>	22
3.4. <u>BALANCE HÍDRICO DEL CICLO DEL CULTIVO</u>	24
3.5. <u>DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO</u>	25

4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	27
4.1.	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO.....	27
4.2.	RESULTADOS GENERALES DEL ENSAYO.....	31
4.3.	COMPONENTES DEL RENDIMIENTO.....	34
4.4.	EFFECTO GLOBAL DE LOS NUTRIENTES.....	40
4.5.	EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE LOS NUTRIENTES.....	44
4.6.	NIVELES CRÍTICOS E ÍNDICES NUTRICIONALES PARA N Y S.....	54
4.6.1.	Índices nutricionales para N y S.....	57
4.7.	VALIDEZ DE LOS ÍNDICES NUTRICIONALES.....	59
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	63
6.	<u>RESUMEN</u>	65
7.	<u>SUMMARY</u>	66
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	67
9.	<u>ANEXOS</u>	76

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Descripción de los estados fenológicos.....	3
2. Absorción de nutrientes cada 1000 kg de grano.	4
3. Extracción de nutrientes cada 1000 kg de grano.....	4
4. Dosis de N y S que recibió cada tratamiento.	20
5. Fecha y estadio del cultivo al momento de los muestreos realizados.	21
6. Valores medios y variabilidad del estadio nutricional del cultivo, producción de biomasa, % MG, aceite logrado por hectárea y rendimiento en grano obtenidos a partir del experimento.	32
7. Valores medios y variabilidad de los principales componentes numéricos del rendimiento.	34
8. Eficiencias agronómicas de uso para N y S.	47
9. Eficiencia fisiológica de uso de N y S.	50
10. Eficiencia de absorción de N y S.	51
11. Eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado.	52
12. Eficiencia de uso del fertilizante azufrado.	52
Figura No.	
1. Régimen pluviométrico y temperatura mensual para serie histórica y año del ensayo para Paysandú.	27
2. Precipitaciones decádica posterior al 1 de mayo de 2015 y ubicación de los momentos más relevantes del ciclo del cultivo (siembra, C1, PC y cosecha).....	28

3. Porcentaje de agua respecto a la capacidad de campo, estimado a partir del balance hídrico.	29
4. Comparación de radiación y temperatura media mensual de la serie histórica con la del ensayo	30
5. Rendimientos medios según tratamiento aplicado.	31
6. Relación entre la biomasa total a cosecha y el rendimiento en grano.	33
7. Materia grasa producida (kg ha^{-1}) en función del rendimiento (kg ha^{-1}).	34
8. Árbol de clasificación para componentes numéricos del rendimiento.	36
9. Relación entre rendimiento kg ha^{-1} y granos m^{-2}	37
10. Relación entre rendimiento kg ha^{-1} y silicuas m^{-2}	38
11. Relación entre el número de granos m^{-2} y número de silicuas m^{-2}	38
12. Relación entre rendimiento kg ha^{-1} y peso de grano.	39
13. Relación entre el rendimiento y grano silicua ⁻¹	40
14. Rendimiento en función de la relación N/S agregado.	41
15. Relación entre el nitrógeno absorbido y el rendimiento.	41
16. Rendimiento en grano en función del S absorbido.	42
17. Árbol de clasificación y regresión para N y S absorbido.	43
18. Relación entre el N agregado y el N absorbido.	44
19. Relación entre el S aplicado y S absorbido.	45
20. Relación entre el N y S absorbido.	46
21. Eficiencia en el uso del N en función del N disponible.	48
22. Eficiencia en el uso del S en función del S disponible.	49

23. Porcentaje de recuperación de nitrógeno aplicado según tratamiento.	53
24. Porcentaje de recuperación de S aplicado según tratamiento.	54
25. Concentración crítica de nitrógeno según modelo de Ferreira y concentración de nitrógeno total en planta en el ensayo.....	55
26. Concentración crítica de azufre según modelo de Ferreira y concentración de azufre total en planta en el ensayo.	56
27. Índice de nutrición nitrogenada a elongación en función del nitrógeno absorbido previo a elongación tanto para azufre limitante como suficiente.	57
28. Índice nutrición azufrada en función del azufre absorbido previo al estadio de elongación.	58
29. Relación entre INN y producción de materia seca en C1 por tratamiento.....	59
30. Relación entre el INN en C1 y el rendimiento final por tratamiento.	60
31. Relación entre la materia seca acumulada y el INS en C1 promedio por tratamiento.	61
32. Relación entre rendimiento y el INS en C1 promedio por tratamiento.....	62

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de colza en Uruguay ha atravesado distintas etapas a lo largo de la historia, en el último tiempo ha pasado de prácticamente no estar presente en el área agrícola en la zafra 2005 a ocupar alrededor de 27 mil hectáreas en la zafra de invierno 2015. Desde el punto de vista del sistema de producción, la colza es la única alternativa de cultivo de cosecha invernal a los cereales de invierno como trigo y cebada, debido a su adaptación biológica como a su potencial económico, además de las ventajas agronómicas (los costos y el largo de ciclo es similar al de los cereales) que este cultivo representaría en un sistema de rotaciones.

El rendimiento medio nacional de las últimas 5 zafras (2010-2014) es de 1340 kg ha⁻¹, con una importante variabilidad entre años y en términos medios representó el 40% del rendimiento medio nacional de trigo.

Una de las grandes limitantes para la obtención de mayores rendimientos es la falta de ajuste de la fertilización. Si bien los resultados de la investigación hacen referencias a las altas respuestas del cultivo a la fertilización nitrogenada y azufrada, los trabajos a nivel local son escasos y no se ha desarrollado un modelo de fertilización adaptado al cultivo en nuestro país.

El desarrollo de un modelo de referencia para la fertilización nitrogenada y azufrada es de vital importancia para el desarrollo del cultivo a nivel local. Para ello es pertinente saber cuánto nitrógeno y azufre se necesita, y en qué momento y cuáles son los indicadores que mejor se ajustan a la respuesta vegetal. Por tal motivo en este trabajo se generaron experimentalmente diferentes curvas de absorción de nitrógeno y azufre en el ciclo de forma de tener elementos que permitan seleccionar los mejores momentos e indicadores de respuesta a la fertilización.

El objetivo general del presente trabajo es mejorar el conocimiento de la respuesta a la fertilización nitrogenada y azufrada del cultivo de colza-canola mediante el manejo de la fertilización, y sumar elementos que permitan en conjunto con trabajos anteriores validar el modelo de respuesta a la fertilización disponible para técnicos y productores.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La colza es una oleaginosa anual invernal que ha sido cultivada por miles de años en Asia, y luego en Europa. Especies de colza incluyen *Brassica napus* L., *Brassica rapa* L., *Brassica júncea* L. y *Brassica carinata*. El mediterráneo es sugerido como su centro de origen más probable (Renard et al., 1994). En la actualidad es uno de los principales cultivos oleaginosos del mundo, ocupando el segundo lugar después del cultivo de soja (FAO, 2011).

La canola es el resultado del mejoramiento genético de colza, siendo acrónimo de “Canadian Oil Low Acid” (Small, 2009). Dicho mejoramiento comenzó en 1974 en la Universidad de Manitoba (Canadá) donde se logró desarrollar el primer cultivar “double low” (Cv. Tower), el cual produce aceite con bajos tenores de ácido erúico (menores al 2%) y harina con menos de 30 $\mu\text{mol g}^{-1}$ de glucosinolatos, los dos elementos que determinan la baja calidad del aceite para consumo humano y de la harina para consumo animal, respectivamente (Martino y Ponce de León, 1999).

El principal producto que se obtiene a nivel mundial a partir de este cultivo es el aceite para consumo humano (Agosti, 2011), considerado de calidad superior debido a su composición de ácidos grasos. En contraparte en nuestro país casi la totalidad de la canola tiene como destino aceite para la producción de biocombustible (Mazzilli et al., 2014).

Para la producción existen dos tipos de canola: invernales y primaverales. Las primeras necesitan ser expuestas a una determinada cantidad de horas de frío para florecer (vernalización), mientras que los de tipo primaveral no requieren de este estímulo (Wang et al., 2011). En la evaluación de cultivares de INIA e INASE (2015) predominan cultivares primaverales, ya que las características de los inviernos en nuestro país muchas veces no permiten que los cultivares invernales acumulen las horas de frío necesarias para que ocurra la floración.

El rendimiento promedio de canola a nivel mundial ha aumentado en los últimos 40 años, pero sin ser acompañado de una estabilidad de rendimiento. Este ha variado entre un 40-60% en comparación al trigo, sin embargo, puede aumentar hasta un 80-100% cuando se los compara en ambientes pobres en donde el cereal rinde por debajo de 2000 kg ha^{-1} (Rondanini et al., 2012).

El cultivo de colza no es muy conocido dentro del ámbito de producción agropecuaria del país, por lo que se considera pertinente definir la escala fenológica utilizada antes de profundizar. Existen distintas escalas que describen los estadios de desarrollo fenológico del cultivo las cuales han sido creadas tanto por institutos

gubernamentales de investigación como por empresas privadas. En el presente trabajo se utilizará la escala CETIOM (1978) ya que es la más comúnmente utilizada tanto en Argentina como en Europa (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de los estados fenológicos (escala CETIOM)

CLASIFICACIÓN	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
A	COTILEDONAR	Cotiledones visibles.
B1	PLÁNTULA	1 hoja verdadera desarrollada.
B2		2 hojas verdaderas desarrolladas.
B3 a B6	ROSETA	Hasta 6 hojas verdaderas desarrolladas.
C1		Aumento de vegetación. Aparición de hojas jóvenes.
C2	ELONGACIÓN	Entrenudos visibles. Vestigios de ramificaciones principales.
D1		Inflorescencia visible.
D2		Botón cubierto. Inflorescencias secundarias visibles.
E		Botón separado.
F1	FLORACIÓN	Primeras flores abiertas.
F2		Alargamiento rama floral. Numerosas flores abiertas.
G1		Caída de pétalos. 10 primeras silicuas de 2 cm de largo
G3	MADURACIÓN	Silicuas con un largo mayor a 4 cm.
G4		Las primeras 10 silicuas comienzan a colorear.
G5		Granos coloreados.

2.2. IMPORTANCIA DE LA NUTRICIÓN MINERAL EN CANOLA

La canola es una oleaginosa muy demandante de nutrientes siendo el nitrógeno (N) y potasio (K) los más requeridos por unidad de grano producido, seguidos por fósforo (P) y azufre (S) (Cuadros 2 y 3, Ciampitti y García, 2009).

Cuadro 2. Absorción de nutrientes cada 1000 kg de grano.

Cultivo	Requerimientos (kg Mg ⁻¹)			
	N	P	K	S
Trigo	30	5	19	5
Cebada	26	4	20	4
Canola	60	15	65	12

Fuente: Ciampitti y García (2009)

Se entiende por absorción la cantidad total de nutrientes absorbido por el cultivo durante su ciclo de desarrollo. Todos los nutrientes que fueron tomados por el cultivo y que se encuentran presente en todos sus tejidos y órganos, cosechables y no cosechables. La cantidad de nutrientes absorbidos por la canola depende del tipo varietal (invernal o primaveral), rendimiento, crecimiento de materia seca y disponibilidad de nutrientes y agua (Orlovius, 2003).

Para producir 1.000 kg de grano por hectárea el cultivo de canola necesita absorber 60 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 15 kg ha⁻¹ de fósforo, 65 kg ha⁻¹ de potasio y 12 kg ha⁻¹ de azufre, absorbe prácticamente la misma cantidad de nitrógeno y azufre que un cultivo de trigo de 2.000 kg ha⁻¹. Para fósforo y potasio la canola absorbe cada 1.000 kg ha⁻¹ de grano producido una cantidad muy similar a la de un cultivo de trigo que rinda 3.000 kg ha⁻¹ (15 kg P ha⁻¹ y 57 kg K ha⁻¹).

Cuadro 3. Extracción de nutrientes cada 1000 kg de grano.

Cultivo	Extracción (kg Mg ⁻¹)			
	N	P	K	S
Trigo	21	4	4	2
Cebada	15	3	5	2
Canola	38	11	28	7

Fuente: Ciampitti y García (2009)

La extracción se define como los nutrientes que son absorbidos y depositados en tejidos y órganos cosechables, y que por lo tanto no son reciclados debido a que no vuelven a ingresar al sistema suelo (Ciampitti y García, 2009). Un cultivo de colza de 2000 kg ha⁻¹ extrae aproximadamente 76 kg ha⁻¹ de N, cantidad un poco inferior a la de un cultivo de trigo de 4000 kg ha⁻¹, el cual extrae 84 kg ha⁻¹ de N (Ciampitti y García, 2009). Para producir 2000 kg ha⁻¹ el cultivo de colza extrae 22 kg ha⁻¹ de P, 56 kg ha⁻¹ de K, 14 kg ha⁻¹ de S, cantidades superiores a las de un cultivo de trigo de 4000 kg ha⁻¹ el cual extrae 16 kg ha⁻¹ de P, 16 kg ha⁻¹ de K y 8 kg ha⁻¹ de S. Al relativizar los datos respecto a un cultivo de trigo, se observa que la colza demanda cantidades similares pero inferiores de N, superiores para P y S, muy superiores en el caso del K ya que un cultivo de canola de 2.000 kg ha⁻¹ de grano extrae 40 kg ha⁻¹ más de K que el cultivo de trigo de 4.000 kg ha⁻¹.

La absorción de fósforo es superior que la de trigo o cebada debido al mayor contenido de proteína en el grano, la extracción del fósforo ocurre rápidamente en etapas tempranas del crecimiento (Martino y Ponce de León, 1999). La canola tiene la particularidad de ser un cultivo muy eficiente en la utilización del fósforo del suelo y del fósforo aplicado por lo que no sería necesario agregar este nutriente en grandes cantidades (Grant y Bailey, 1993). La ausencia de deficiencias de fósforo es fundamental porque permite una adecuada implantación y permite obtener una roseta de mayor tamaño en menor tiempo (Iriarte, 2002), también permite un mayor desarrollo radical con más ramificaciones y raíces secundarias, favoreciendo la exploración del suelo y por tanto una mayor capacidad de soportar adversidades climáticas (Martino y Ponce de León, 1999). En estudios realizados en el sudeste de la provincia de Buenos Aires por González Montaner y Di Napoli (2009) observaron que la fertilización fosforada en canola se puede manejar de igual manera que para trigo, pero con un nivel umbral de P extractable Bray-1 de 15 ppm. Debajo de estos niveles, se incrementa la probabilidad de respuesta a la fertilización fosforada en términos de rendimiento y retorno económico.

El potasio (K) es muy importante para el desarrollo de la planta y es utilizado en grandes cantidades por la canola durante su crecimiento (Martino y Ponce de León, 1999), sin embargo, es el nutriente que menos frecuentemente limita el rendimiento (Grant y Bailey, 1993). La adecuada disponibilidad de este confiere a la planta resistencia a enfermedades, insectos, sequías y heladas (Thomas, 1995) además de que sólo una pequeña porción de lo absorbido es exportado en el grano (Grant y Bailey, 1993), por lo que la cosecha no provoca extracciones de importancia (Pouzet, citado por Ferreira, 2014).

2.3. NITRÓGENO

El nitrógeno cumple funciones vitales en los seres vivos. Es requerido en grandes cantidades en los tejidos de las plantas encontrándose tanto en formas orgánicas como inorgánicas, forma parte de proteínas, aminoácidos, nucleótidos y clorofila (Martino y Ponce de León 1999, Perdomo et al. 2008).

Las ganancias de nitrógeno al sistema suelo-planta son la fertilización, la fijación biológica, el nitrógeno que entra con lluvias, es decir nitrógeno que estaba fuera del sistema. La mineralización, si bien no es una ganancia para el sistema, constituye la principal fuente de nitrógeno para las plantas en ecosistemas no disturbados (García, 1996). Los responsables de este proceso son los microorganismos presentes en el suelo, quienes a partir del nitrógeno orgánico presente en la materia orgánica producen amonio (NH₄) y nitrato (NO₃), formas que pueden ser absorbidas por las plantas (Canola Council, 2013).

2.3.1. Importancia del nitrógeno para la producción

El cultivo de colza posee una elevada demanda de nitrógeno y un mayor umbral de requerimientos que los demás cultivos extensivos (Colnenne et al., 1998). Es además, el nutriente que en general más influye en el rendimiento y la calidad del producto a obtener en la actividad agropecuaria (Perdomo et al., 2008). Cuando este nutriente no es limitante se obtienen rendimientos relativos elevados explicados básicamente por un crecimiento mayor y más vigoroso de las plantas, que determina una mayor eficiencia fotosintética y una mayor vida foliar (Martino y Ponce de León, 1999).

La cantidad de biomasa producida a elongación, caída de flores y madurez está correlacionada positivamente con el rendimiento en grano (Sarandón et al., citados por Martino y Ponce de León, 1999), el cual aumenta frente a incrementos en la disponibilidad de nitrógeno (Grant y Bailey, 1993). Lo mismo concluyó Agosti (2011), quien logró mediante aplicaciones sostenidas de nitrógeno durante el ciclo del cultivo un mayor rendimiento en grano a través de aumentos en la biomasa total producida sin cambios en el índice de cosecha. En el 72% de los casos la variación en biomasa producida está dada por nitrógeno (Miller et al., 2003). Según Iriarte (2002) es recomendable realizar la fertilización nitrogenada en estadios vegetativos tempranos (roseta 4-6 hojas) para que el nitrógeno esté disponible en el momento de mayor requerimiento (50% de floración), momento en el cual el IAF es máximo (Almond et al., 1986).

En cuanto a los efectos positivos del nitrógeno sobre los componentes del rendimiento, este nutriente logra aumentos del rendimiento, a través del incremento de la densidad de silicuas, y no por un aumento en el peso de grano (Miller et al., 2003). Es

decir, dentro de los componentes numéricos del rendimiento el número de granos es más sensible que el peso de granos a cambios en la disponibilidad de nitrógeno (Peltonen-Saino y Jauhiainen, 2008). En cuanto al índice de cosecha el mismo no muestra respuesta frente a distintas disponibilidades de nitrógeno (Miller et al., 2003).

El efecto de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de aceite y proteína en grano ha sido ampliamente estudiado. Cordeiro et al. (1993), Asare y Scarisbrick (1995), Karamanos (2007), Agosti (2011) reportaron que el porcentaje de aceite y el de proteínas presentaban un comportamiento inverso frente a cambios en la disponibilidad de nitrógeno. Estos autores mencionan que con el aumento de las dosis aplicadas el tenor oleo de los granos cae linealmente, mientras que el contenido proteico crece linealmente. Hasta el momento no son totalmente claros los mecanismos fisiológicos que llevan a dicha respuesta (Triboi y Triboi-Blondel, citados por Agosti, 2011). Aunque ocurra una caída del contenido de aceite en grano la cantidad de aceite producida por hectárea podría mantenerse constante o incluso aumentar, como consecuencia de una mayor producción de grano (Martino y Ponce de León, 1999). El contenido de aceite del grano maduro de colza-canola puede alcanzar 50-52 % del peso seco del grano. Sin embargo, este valor frecuentemente resulta menor en condiciones de producción, variando de acuerdo al genotipo, las condiciones ambientales durante el llenado de los granos y algunas prácticas de manejo como la fecha y densidad de siembra y el nivel de fertilización (Agosti, 2011).

La cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por un cultivo está estrechamente relacionada con el total de biomasa producida, y esta última con el rendimiento. El mayor impacto del nitrógeno en general se ha observado en la radiación fotosintéticamente activa interceptada, que aumenta ante una mayor oferta nutricional (Justes et al., 2000). Por lo tanto una elevada disponibilidad de nitrógeno previo al comienzo de la senescencia de las hojas podría determinar mayor área foliar y duración de la misma garantizando una mayor provisión de asimilados, lo que se traduciría en el logro de un mayor número de silicuas y grano por silicua (Tamagno et al., 1999), lo cual es importante considerando el alto contenido de aceite del grano de canola que hace que la eficiencia en el uso de la radiación sea relativamente baja (comparada con granos de cereales) cuando la biomasa producida no se corrige por su valor energético, especialmente durante el llenado de los granos (Agosti, 2011).

Por su parte cuando ocurre un exceso de nitrógeno pueden producirse pérdidas de rendimiento a causa del vuelco de plantas (Mazzilli et al., 2014), además de la consecuente reducción en el contenido de aceite (%) (Agosti, 2011). Es probable que bajo elevados niveles de nitrógeno se impida que el máximo potencial sea logrado debido a que pueden formarse silicuas en exceso, las cuales se somborean entre si dentro del cultivo, a la vez, si las silicuas no abortan otros factores pueden aparecer reduciendo el rendimiento, o el cultivo no puede proveer suficientes asimilados para completar el

llenado de los granos, especialmente cuando el IAF máximo ocurre cerca del 50 % de floración luego del cual disminuye rápidamente (Almond et al., 1986).

2.3.2. Nitrógeno en planta

Durante etapas tempranas de crecimiento el fenómeno de dilución del nitrógeno es poco importante debido a la ausencia de competencia por luz entre plantas (Lemaire et al., citados por Ferreira, 2014). Sin embargo, la concentración de nitrógeno en todos los órganos, excepto las semillas, disminuye durante el crecimiento del cultivo a consecuencia del efecto de dilución ocasionado por una mayor tasa de acumulación de materia seca que de nitrógeno (Chamorro et al., citados por Ferreira, 2014).

Para estimar si el cultivo se encuentra en condiciones nutricionales correctas se utiliza la concentración de nitrógeno crítico (N_c) como una referencia fundamental en cualquier etapa de crecimiento, ya que permite determinar si la nutrición nitrogenada de los cultivos es óptima o sub-óptima con respecto a la tasa de crecimiento del cultivo (Gastal y Lemaire, 2002). La concentración crítica es definida como la mínima concentración de nitrógeno requerida para lograr la máxima tasa de crecimiento del cultivo (Greenwood, 2001). Según Grant y Bailey (1993) el rango de requerimiento de nitrógeno en biomasa puede variar entre 2,5 y 4% según el estadio. Valores por debajo de 2% son considerados insuficientes mientras que superiores al 5% puede ser excesivos (Grant y Bailey, 1993). Ferreira (2014) analizando los índices nutricionales nitrogenados (relación entre la concentración actual de nitrógeno y la concentración crítica) encontró un valor crítico de 1.04 para la producción de biomasa en C1. Para la producción de grano, bajo la condición de azufre suficiente, no existió limitante de nitrógeno en planta en todo el rango de estado nutricional estudiado y, en cambio, bajo la condición de azufre limitante la respuesta del rendimiento del estado nutricional nitrogenado fue lineal. Es importante tener en cuenta que la respuesta al agregado de nitrógeno en C1 se obtuvo para el rango de los datos diagnosticados como nitrógeno limitante y azufre suficiente (Ferreira, 2014).

Se reconocen las plantas de canola sanas con un correcto suministro de nitrógeno por su color verde oscuro. Debido a la movilidad que presenta este nutriente en planta, en caso de ocurrir deficiencias, estas se manifiestan primeramente en hojas y tallos viejos (Martino y Ponce de León, 1999). Deficiencias en nitrógeno producen una caída en la biomasa producida como consecuencia de la reducción en la radiación interceptada (Lemaire et al., 2008). El crecimiento de las plantas es pobre, produciendo tallos principales cortos y flacos, con muy pocas ramas y restos de canopeo delgado y abierto, el cual senece precozmente (Almond et al., 1986). Además, el período de floración se acorta, reduciendo el número de silicuas por unidad de superficie (Grant y Bailey, 1993). Además de que es un nutriente que ejerce un cierto control en el balance de fitohormonas dentro de la planta, una deficiencia aceleraría la producción de ácido

abscísico (ABA) el cual juega un rol importante en el proceso de envejecimiento y así acorta el período de crecimiento y el llenado de asimilados en los granos (Orlovius, 2003).

2.4. AZUFRE

El elevado porcentaje de proteína combinado con la alta proporción de cisteína y metionina en grano hace que la canola tenga altos requerimientos de azufre (Grant y Bailey, 1993). El sulfato inorgánico (SO_4^-) es la principal forma bajo la cual las plantas adquieren el azufre del suelo (Anderson, 1990), siendo este compuesto transportado hasta las hojas por vía xilemática donde es reducido a cisteína y luego a metionina (Orlovius, 2003).

2.4.1. Importancia del azufre para la producción

La colza es reconocida como un cultivo con elevados requerimientos nutricionales, destacándose por su relativamente alta demanda de azufre. Este macronutriente limita la producción de grano tanto como la de aceite (Pinkerton, 1998). Su deficiencia frecuentemente restringe el rendimiento (Grant y Bailey, 1993), condicionando además, la respuesta a la disponibilidad de nitrógeno (Zamora y Massigoge, 2008).

Los requerimientos de azufre para alcanzar altos rendimientos y buena calidad de grano tienden a incrementar a medida que aumenta la cantidad de nitrógeno aplicado (Malhi y Gill, 2006). Mazzilli y Hoffman (2010) en un ensayo realizado en el departamento de Paysandú reportan que aquellos sitios que recibieron un aporte de 20 kg de azufre ha^{-1} a la siembra el rendimiento concretado fue cuatro veces superior a aquellos sin azufre a la siembra (556 kg ha^{-1} vs. 2138 kg ha^{-1}). El agregado tardío de azufre mostró una respuesta importante, pero continuó siendo inferior al agregado a la siembra. Por su parte, Ferreira (2014) indica la necesidad de una cantidad mínima de azufre absorbida de 6 kg S ha^{-1} para alcanzar un mínimo del 90 % del rendimiento relativo.

En relación al contenido de aceite en grano Asare y Scarisbrick (1995), Ahmad et al. (2000) sostienen que el incremento de la disponibilidad de azufre se asocia con un mayor contenido de aceite en grano, aunque de menor calidad debido al incremento en el contenido de glucosinolatos en el aceite (Fismes et al. 2000, Burzaco et al. 2009). Un indicador útil que sirve para orientar y predecir la cantidad de aceite en grano es la relación entre Nt: St, la cual no resultó útil para predecir el estado nutricional del cultivo para el crecimiento y producción de grano, pero si lo hizo para la concentración de aceite con un valor crítico 7,7, aunque el rendimiento fue más importante que la

concentración de aceite en determinar la productividad de este elemento (Ferreira, 2014).

Sin embargo, los efectos del azufre sobre los componentes numéricos del rendimiento han sido mucho menos estudiados en relación al nitrógeno, observándose pocos efectos significativos sobre el peso y número de granos (Asare y Scarisbrick, 1995). Sin embargo, según Orlovius (2003) el número de granos por silicua es apenas modificado por la nutrición nitrogenada comparado con el efecto que provocan las deficiencias de azufre. La baja disponibilidad de azufre limita el número de granos por silicua, inclusive cuando la disponibilidad de nitrógeno es adecuada. A pesar de ello se han determinado pérdidas de hasta 80% de rendimiento en grano, y 20% en reducción en la concentración de aceite debido a deficiencias de azufre (Hocking et al., 1997). Deficiencias medias suelen reducir el rendimiento sin mostrar síntomas aparentes, por lo que se hace imprescindible un esquema de fertilización basado en análisis de suelo y planta (Hocking et al., 1997). La respuesta al azufre se presenta en lotes con bajo contenido de materia orgánica, reducida estabilidad estructural, prolongada historia agrícola, indicios de erosión en el suelo y escasa o nula historia de fertilización azufrada (Ferraris et al., 2004).

2.4.2. Azufre en planta

Para determinar la dosis de fertilizante azufrado a aplicar la metodología de diagnóstico basado en análisis de planta parecen ser preferidos a los de suelo porque diferentes factores hacen que sea difícil llevar a cabo un análisis de suelo que realmente cuantifique el potencial de azufre disponible (Maynard et al., 1983). Lo mencionado anteriormente es coincidente con los datos obtenidos por Zhao y McGrath (1994) donde no se encontraron correlaciones elevadas entre el azufre extractable de suelo y el rendimiento obtenido, por lo cual el azufre extractable carece de valor como herramienta para diagnosticar la necesidad de fertilización azufrada.

Según Pinkerton (1998) el contenido de azufre total en la biomasa fue uno de los indicadores más satisfactorios del estado nutricional del cultivo, este autor menciona que el nivel crítico de azufre en la biomasa a los 71 días post-siembra es de 0,22%. Por otra parte, Ferreira (2014) determinó mediante las curvas de dilución los valores críticos de nutrición azufrada de 0.88 % y 0.74 % para la máxima producción de biomasa en elongación (C1) y grano respectivamente. Otros autores como Grant y Bailey (1993), mencionan que cuando el contenido en planta es menor a 0.2% es considerado bajo, entre 0,2 y 0,25% marginal, y excesivo cuando supera el 1%. Según Thomas (1995), un cultivo de esta oleaginosa que produzca 2000 kg ha⁻¹ de grano contendrá aproximadamente 12 Kg ha⁻¹ de azufre en grano y 12 Kg⁻¹ más en el rastrojo.

El azufre no es un nutriente removible desde los tejidos viejos de la planta hacia los que están en activo crecimiento, por lo que, al estar implicado en la floración y formación de granos, deficiencias en dichas etapas tendrán efectos negativos sobre el rendimiento (Malhi, 1999). Es un nutriente poco móvil en la planta, por lo tanto, son las hojas más jóvenes quienes manifiestan los síntomas de deficiencias (Martino y Ponce de León, 1999), siendo el síntoma un amarillamiento general de la hoja (Grant y Bailey, 1993). Deficiencias moderadas de este nutriente, por lo general no muestran síntomas, pero si pueden reducir el rendimiento en grano. Los síntomas visuales se hacen presentes cuando la deficiencia en azufre es severa, los mismos son más fáciles de apreciar a floración ya que los requerimientos de azufre durante esta etapa son importantes (Grant y Bailey, 1993). La insuficiencia de azufre puede provocar también atrasos en la floración y maduración de la canola. La planta produce vainas pequeñas que se ubican principalmente en el estrato superior de la planta (Grant y Bailey, 1993). El cultivo de colza ha mostrado ser extremadamente sensible a la deficiencia de este nutriente, llegando a no producir grano en condiciones de deficiencia severa (Mazzilli y Hoffman, 2010).

2.5. INTERACCIÓN ENTRE NITRÓGENO Y AZUFRE

Debido a la estrecha relación existente entre nitrógeno y azufre asociados al rol central en la producción de proteínas (Orlovius ,2003) es necesaria una correcta complementación del nitrógeno con un adecuado suministro de azufre (Zamora y Massigoge, 2008). El azufre permitiría un uso más eficiente del nitrógeno, relacionándose con el hecho de que el azufre juega un papel importante en la activación de la enzima nitrato reductasa, necesaria para la conversión de NO_3^- a aminoácidos en las plantas. Una baja actividad de esta enzima, reduce los niveles de proteínas a la vez que incrementa los niveles de NO_3^- en planta (Agropecstar, citado por Planchón y Figares, 2004). Se han obtenido niveles mayores de nitrato en planta en situaciones de deficiencia de azufre, lo que pone en evidencia que niveles bajos de éste nutriente en el suelo no afecta la absorción de nitrógeno por parte de la planta, sino que, interfiere en el metabolismo de la misma (Martino y Ponce de León, 1999).

Cuando el nitrógeno se combina con aplicaciones de azufre, las respuestas son lineales y positivas hasta niveles de 200 kg N ha^{-1} , pero si la deficiencia de azufre no es reconocida o es mal interpretada como deficiencia de nitrógeno, y se incrementa la fertilización con nitrógeno, la respuesta es negativa (González Montaner y Di Napoli, 2009). Se debe tener en cuenta que la interacción entre estos nutrientes es sinérgica a dosis optimas y antagónicas a niveles excesivos de uno de ellos (Fismes et al. 2000, Šiaudinis y Butkute 2013). Cuando se fertiliza colza con altas dosis de nitrógeno, es necesario incrementar adecuadamente los niveles de azufre para un óptimo rendimiento de granos, permitiendo un suministro constante de azufre fácilmente disponible desde la emergencia hasta la elongación de la vara floral (Malhi, 1999).

González Montaner y Di Napoli (2009) afirman que el azufre es un factor limitante, por lo cual, en ausencia del mismo, el incremento del nitrógeno disponible mediante fertilización nitrogenada, afecta negativamente el rendimiento del cultivo. Resultados similares han sido expresados por Nuttall, citado por Martino y Ponce de León (1999) quien sostiene que el azufre interfiere en la respuesta al nitrógeno, pudiendo provocar la falta de respuesta por este o que la misma sea negativa (Adrover y Ferreira, 2012). La severidad de las deficiencias de azufre estuvo directamente influenciada por la cantidad de nitrógeno aplicado, las plantas que no recibieron nitrógeno no mostraron deficiencias aparentes de azufre, mientras que aquellas a las que se les fue suministrado, particularmente en altos niveles, presentaron síntomas que sugirieron serios desórdenes fisiológicos (Janzen y Bettany, 1984).

Los elevados requerimientos de nitrógeno y azufre llevaron a la existencia de recomendaciones de manejo de nutrientes basadas en relaciones N/S en suelo de 7:1 (Grant y Bailey, 1993). Por otra parte Agosti (2011) no encontró interacción N x S, esto posiblemente sea debido a que el testigo no haya sufrido limitantes de azufre gracias al aporte del suelo. Para las condiciones agroclimáticas del Uruguay, Ferreira (2014) concluyó que la tasa de dilución del contenido de azufre crítico (S_c), resultante de la ecuación de regresión potencial, resulto menor a la del nitrógeno crítico (N_c) durante el ciclo del cultivo estudiado ($b = -0.18$ y -0.36 para azufre y nitrógeno respectivamente), lo que coincide con lo reportado por Reussi et al. (2012) para el cultivo de trigo. Esta dilución diferencial de ambos nutrientes generaron una relación N_c/S_c variable entre 3.3 y 6.9, sin un patrón de comportamiento en relación a la acumulación de biomasa del cultivo, este aspecto condiciona el uso de esta relación como indicador del diagnóstico al igual que sucedió en trigo según Reussi et al. (2012). Por lo cual la utilización de dicha relación no resulto útil para predecir el estado nutricional del cultivo para el crecimiento y producción de grano pero si lo hizo para la concentración de aceite.

2.6. FRACCIONAMIENTO Y MOMENTO DE APLICACIÓN

Para lograr una producción sostenible se requiere un eficiente suministro de nitrógeno, lo que está relacionado no sólo con la dosis de fertilizante aplicado, sino con el momento en que está disponible para el cultivo (Tamagno et al., 1999). En tanto Salvagiotti et al. (2009) determinaron que se pueden lograr aumentos del rendimiento y la eficiencia de uso del nitrógeno mediante el fraccionamiento del fertilizante y por tanto aumentar los beneficios económicos y reducir los riesgos de pérdidas que provoquen daño al medio ambiente.

Para realizar una correcta fertilización se debe considerar la dosis de fertilizante aplicado, y también el momento en que está disponible para el cultivo (Tamagno et al., 1999), ya que la etapa crítica en la determinación del rendimiento comienza entre dos y tres semanas luego del inicio de la floración (Tayo y Morgan, 1975). La dosis

fraccionada de fertilizante nitrogenado, parte en la siembra y parte en el primer o ambos estadio mencionado, podría ser una alternativa para mejorar el rendimiento y la eficiencia en el uso del nitrógeno en el cultivo de colza (Tamagno et al., 1999).

Los datos obtenidos en ensayos realizados en Argentina muestran que la fertilización nitrogenada sólo provocó aumentos en rendimiento y biomasa cuando se realizó de forma fraccionada (Iriarte, 2002), en parte debido a que el cultivo tiene una baja capacidad de aprovechar la alta disponibilidad de nitrógeno en estadios tempranos del desarrollo (Tamagno et al., 1999). Además, para lograr un uso más eficiente del agua del suelo se deberían evitar aplicaciones desbalanceadas hacia la siembra ya que aumentan el consumo de agua en roseta, provocando un crecimiento exagerado que genera problemas de abastecimiento hídrico para etapas finales (Burzaco et al., 2009).

Otros ensayos realizados por Valenzuela y Gallardo, citados por Adrover y Ferreira (2012) de diferentes momentos de fertilización (siembra, estado de roseta y floración) encontraron que la aplicación en estado de roseta fue la que permitió obtener los mayores rendimientos. La fertilización a floración en cambio, debió su falta de eficiencia a que en este momento los componentes de los rendimientos están en su mayoría definidos. Por su parte Cordeiro et al. (1993) encontraron mayores rendimientos cuando fraccionaron la aplicación de nitrógeno, la mejor práctica fue de 1/3 a la siembra y 2/3 a los 30 ó 60 días de la emergencia, aunque esto estuvo muy influenciado por las precipitaciones ocurridas post-siembra. Según Newbould, citado por Tamagno et al. (1999) la práctica más utilizada para la aplicación de N es mediante la fertilización en la siembra. Sin embargo, debido a las pérdidas de N-NO_3^- por lixiviación, es posible que las dosis aplicadas no sean totalmente aprovechadas por el cultivo en los estados de mayor requerimiento de este nutriente.

Cuando se menciona el fraccionamiento del azufre este no parece ser necesario, como lo demostraron Mazzili y Hoffman (2010) los cuales concluyeron que el agregado de S a elongación cuando ya se agregó a la siembra, no sólo no mostro respuesta, sino también una leve tendencia a la disminución del rendimiento. Coincidiendo con lo mencionado por Nuttall et al., citados por Planchón y Figares (2004) quienes mencionan que la mayor respuesta en suelos pobres se obtiene agregando el azufre a la siembra, sin embargo, estos autores agregan que es posible encontrar respuestas a la aplicación más tardía en suelos con buena disponibilidad de azufre inicial. Iriarte (2002) encontró respuesta a la fertilización azufrada en suelos con bajos contenidos de materia orgánica cuando los niveles de S-SO_4 a siembra fueron menores a 6 ppm. La dinámica del nitrógeno en el suelo es muy similar a la de azufre, lo cual implica que las dificultades para predecir las dosis necesarias de nitrógeno son igualmente válidas para el azufre (Martino y Ponce de León, 1999). Debido a esta dinámica, existe un fuerte componente ambiental en la respuesta a la fertilización fraccionada en colza, principalmente dependiente de las condiciones hídricas del año (Tamagno et al., 1999).

2.7. EFICIENCIA DE USO DE LOS NUTRIENTES

Existen distintas ineficiencias en el sistema suelo-planta que hacen que no todo el fertilizante aplicado sea absorbido por la planta. Distintos factores influyen sobre la mismas entre las que se encuentran: (i) la movilidad del nutriente en el suelo, (ii) la demanda del cultivo durante el ciclo, (iii) el momento de aplicación, (iv) la dosis y el fraccionamiento de la fertilización (Agosti, 2011).

Por décadas los rendimientos se han elevado en base a altas dosis de fertilizantes nitrogenados, siendo aún importantes para poder abastecer de alimento a la creciente población del mundo (Tilman et al., 2002), como consecuencia importantes cantidades de nitrógeno no son recuperadas por los cultivos (Smil, 1999), por lo tanto cantidades perjudiciales de nitrógeno y fósforo contaminan el medio ambiente (Tilman et al., 2002), siendo necesario aumentar la eficiencia de uso de los nutrientes para disminuir los riesgos de contaminación ambiental (Barbieri et al., 2008).

Según Smil (1999) las tasas de recuperación promedio de nitrógeno son alrededor del 46 - 56 % (media 50 %), para la colza muchos autores han reportado una muy baja recuperación de nitrógeno en los cultivos cultivados a campo, los valores no superan el 50-60% cualquiera sea el nivel de fertilizante aplicado (Hocking et al. 1997, Smil 1999).

La eficiencia agronómica de uso del nitrógeno ($EAUN = \text{kg grano por kg N disponible o N aplicado}^{-1}$) se define como la transformación del N disponible (el del suelo + fertilizante) en rendimiento (Giller, citado por Agosti, 2011). Esta eficiencia puede ser analizada a través de sus dos componentes: (i) la eficiencia de absorción (EAN), i.e. la relación entre el nitrógeno absorbido y el nitrógeno disponible (Giller, citado por Agosti, 2011), y (ii) la eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno (EFUN), que muestra la relación entre el rendimiento y el nitrógeno absorbido (Giller, citado por Agosti, 2011).

Hocking et al. (1997) mencionan una reducción de la EAUN al aumentar la disponibilidad de nitrógeno, siguiendo la ley de crecimientos decrecientes. Para el caso de trigo, Salvagiotti et al. (2009) encontraron un aumento en la EAUN al fertilizar con azufre, como consecuencia de aumento en la EAN sin que se produjera cambios en la EFUN, por lo tanto, es esperable una mayor absorción de nitrógeno cuando la disponibilidad de este se mantiene fija, pero aumenta la de azufre. Tamagno et al. (1999) reportaron que la eficiencia agronómica del nitrógeno para la producción de grano aumento con el fraccionamiento de la fertilización (todo aplicado a la siembra vs $\frac{1}{2}$ a la siembra y $\frac{1}{2}$ en C2) desde 5,63 hasta 11,35. En la misma línea Orcelett et al. (2015), reportaron que la mayor sincronización entre la oferta y la demanda de nitrógeno por

parte del cultivo producto del fraccionamiento se ve reflejada en una mayor eficiencia de uso del nitrógeno (EUN).

Muchos datos de investigación han demostrado que existe una gran variación entre los valores de eficiencia del nitrógeno aplicado como fertilizante en diferentes cultivos. Esto se debe a la variabilidad de manejo, dosis y condiciones ambientales al momento de la aplicación (Boaretto et al., 2008). Excesos hídricos, baja evapotranspiración y escasa absorción de nitrógeno por parte del cultivo son condiciones que generan bajas EUN y por lo tanto un ambiente propicio para las pérdidas de nitrógeno del sistema, probablemente vía lixiviación (Barbieri et al., 2008)

2.8. CURVA DE DILUCIÓN E ÍNDICES DE ESTADO NUTRICIONAL

La tasa de producción de materia seca está determinada por la cantidad de radiación interceptada, la cantidad de agua disponible y por la disponibilidad de nutrientes (Connor y Sadras 1992, Andrade 1995). Entre los nutrientes, el nitrógeno es el que en mayor medida limita la producción, de ahí la importancia de conocer los requerimientos nutricionales y realizar diagnósticos de deficiencias (Díaz-Zorita, citado por de Caram, 2007). La concentración de nitrógeno que le permite al cultivo alcanzar la tasa de crecimiento máxima se denomina concentración crítica; estas concentraciones varían de acuerdo a la biomasa aérea considerada, ya que a medida que ésta aumenta se produce un efecto de dilución del nitrógeno en la planta (de Caram, 2007).

Entre las metodologías que utilizan la determinación de nitrógeno total en planta, las denominadas “curvas de dilución” son propuestas como una herramienta a ser utilizada en el diagnóstico de la nutrición nitrogenada. La diferencia entre la concentración de nitrógeno actual (N_a) y el correspondiente nivel de nitrógeno crítico (N_c) para una cantidad dada de biomasa aérea, indica la intensidad de la deficiencia de N (o exceso) experimentada por el cultivo (Colnenne et al., 1998).

Colnenne et al. (1998) determinaron una curva de dilución de nitrógeno en colza invernal válida para valores de acumulación de materia seca entre 1,43 y 6,47 Mg ha⁻¹, representada por la siguiente ecuación: $\%N_c = 4,48MS^{-0,25}$, donde MS es la cantidad de materia seca aérea total acumulada en un momento expresada en Mg ha⁻¹. Para las condiciones agro-ecológicas de Uruguay Ferreira (2014) obtuvo ecuaciones de dilución para la concentración crítica de nitrógeno y azufre ($N_c = 5,21 MS^{-0,36}$ y $Sc = 1,22e^{-0,18MS}$ respectivamente).

Varios autores han demostrado que la reducción en la tasa de crecimiento del cultivo es proporcional a la relación N_a/N_c y han propuesto el uso de esta relación como un índice de nutrición nitrogenada (Justes et al. 1994, Colnenne et al. 1998), a partir del cual se puede predecir la respuesta del cultivo al agregado de N vía fertilizante.

El índice nutricional para nitrógeno (INN) es determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{INN} = N_{\text{act}}/N_{\text{c}}$$

Donde N_{act} corresponde a la concentración de nitrógeno determinada en la biomasa y N_{c} al nitrógeno crítico estimado a partir de la curva de dilución.

Para determinar el índice de nutrición azufrada (INS) se aplica la misma metodología

$$\text{INS} = S_{\text{act}}/S_{\text{crítico}}$$

Los índices nutricionales son utilizados como una herramienta de diagnóstico con el objetivo de predecir el nivel crítico de un determinado nutriente para producir la máxima cantidad de biomasa seca en un momento determinado.

Ferreira (2014) encontró a partir de sus ecuaciones que el índice crítico de nutrición azufrada fue de 0,88 y 0,74 para la máxima producción de biomasa en elongación y grano respectivamente, para nitrógeno solamente se encontró valor crítico de 1.04 para la producción de biomasa en elongación. Para la producción de grano se observó que bajo condición de azufre suficiente no existió limitante de nitrógeno en planta en todo el rango de estado nutricional estudiado y, en cambio, bajo condición de azufre limitante la respuesta del rendimiento al estado nutricional nitrogenado fue lineal.

2.9. POTENCIAL Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

El rendimiento medio de los últimos 5 años en el Uruguay es de 1340 kg ha⁻¹ (Silveira y Mazzilli, 2015), siendo este valor inferior al promedio a nivel mundial el cual se ubica en los 1720 kg ha⁻¹ para la serie de años 2000-2009 (Rondanini et al., 2012). A su vez estos rendimientos son bastante inferiores al potencial teórico de la especie el cual se ubica cercano a los 5000 kg ha⁻¹ (Gómez y Miralles, 2006).

Los cultivares de canola que formaron parte de la evaluación de cultivares de INIA e INASE en el año 2015 fueron 12, de los cuales 4 de ellos han sido evaluados por 3 o más años. El rendimiento medio para el 2015 fue de 4849 y 4491 kg ha⁻¹, para las localidades de La Estanzuela y Young respectivamente. La variedad Rivette, variedad utilizada en el presente ensayo y la cual funciona como testigo en la evaluación de cultivares tuvo un rendimiento medio de 3638 Kg ha⁻¹ para el período 2013-2015 (INIA e INASE, 2015).

Si bien durante todo el ciclo del cultivo se van generando componentes numéricos y fisiológicos del rendimiento, es posible identificar una ventana crítica (período crítico) para la generación de rendimiento donde una disminución de los recursos (agua, nutrientes, y radiación) o algún estrés, producirá una importante reducción del rendimiento final del cultivo (Mingeau, citado por Agosti, 2011). Para el caso de canola este período crítico se ubica aproximadamente en 2-3 semanas posteriores al inicio de floración (Habekotté, 1997).

El rendimiento es producto de la biomasa total generada y el índice de cosecha, siendo este el atributo que más limita el rendimiento (Diepenbrock, 2000). Habekotté (1997) cita valores de índice de cosecha (IC) de 25% a 30% los cuales son relativamente bajos si se los compara con los de trigo o cebada.

Diepenbrock y Grosse, citados por Agosti (2011) mencionan, dentro de los componentes numéricos del rendimiento, al número de plantas m^{-2} , silicuas planta $^{-1}$, granos silicua $^{-1}$ y peso del grano como los de mayor importancia. Dentro de estos el número de granos es el más importante y el peso de grano el más estable frente a modificaciones del ambiente (Peltonen-Saino y Jauhiainen, 2008).

2.10. INFLUENCIA DE LOS FACTORES AMBIENTALES

El entendimiento de los procesos que regulan la tasa de desarrollo del cultivo, en cada fase fenológica particular, constituye un elemento indispensable para predecir el comportamiento agronómico y el rendimiento en un área de régimen climático conocido. Los procesos que regulan la tasa de desarrollo son complejos, debido a que responden a factores tanto genéticos como ambientales (temperatura, fotoperíodo y vernalización) existiendo en algunos casos, interacción entre ellos (Miralles et al., 2003), en cuanto que la producción de materia seca y el rendimiento dependen fuertemente de la captación de recursos: luz, agua y nutrientes (Chamorro y Tamagno, 2004).

Por su parte, la disponibilidad hídrica tiene efectos muy importantes sobre muchos procesos que ocurren dentro de las plantas, los cuales incluyen una reducción de fotosíntesis, acumulación de materia seca, intercambio gaseoso y síntesis proteicas (Larcher, 2004). El déficit hídrico es el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento cuando se considera a los cultivos de secano (Boyer, citado por Dardanelli et al., 2003). Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con suficiente velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la ETc. A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo este por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo

comenzará a sufrir estrés. La fracción del total de agua disponible que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo, y valor en el caso del cultivo de canola es 0,60 (Allen et al., 2006). Chamorro y Tamagno (2004) mencionan la existencia de un período crítico para estrés hídrico, el cual está comprendido por los períodos elongación y floración.

En ensayos realizados por Din et al. (2011), quienes evaluaron el impacto del déficit hídrico en distintos cultivares de canola pudieron observar que cuando el estrés ocurrió en floración se redujo en promedio un 23% la cantidad de clorofila a+b en hojas. Los mismos autores registraron un aumento de prolina en hojas de plantas sometidas a estrés hídrico, lo cual, según Díaz et al. (1999), es una respuesta común en plantas estresadas en consecuencia del descenso del potencial hídrico.

Por su parte, Qaderi et al. (2006) reportaron que plantas estresadas por encontrarse en condiciones de déficit hídrico produjeron menos hojas que aquellas que no sufrieron dicho estrés, a su vez las hojas formadas fueron de menor tamaño. Din et al. (2011) reportan que el rendimiento en grano y sus componentes fueron significativamente afectados por deficiencias hídricas ocurridas a inicio de floración y llenado de granos, siendo mayor la reducción del rendimiento cuando el estrés ocurrió en floración. El estrés hídrico durante las etapas antes mencionadas provocó una caída del rendimiento a través de una reducción en el número de silicuas y el número de granos por silicua.

A partir de ensayos realizados en el oeste de Australia, Si y Walton (2004) señalan que, en comparación con la concentración de aceite, el rendimiento es más afectado por los factores climáticos. Tanto el rendimiento como el contenido de aceite se relacionan negativamente con la temperatura, decreciendo rápidamente a medida que esta aumenta. Si y Walton (2004) estudiaron que para un rango de temperaturas evaluadas que van desde 11,5 °C a 18,5 °C, la caída promedio fue de 289 kg ha⁻¹ y de 0,68% por cada °C por encima de 11,5 °C, para rendimiento y contenido de aceite en grano respectivamente. En contraparte, las precipitaciones ocurridas post-antesis afectan positivamente a los factores mencionados anteriormente, habiéndose encontrado una respuesta de 116 kg ha⁻¹ y de 0,7% por cada 10 mm precipitados.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Para poder cumplir con los objetivos propuestos se instalaron dos experimentos durante el invierno del año 2015, el primero en una chacra comercial perteneciente a la empresa “Kilafen” en el establecimiento “San Juan de Young” (32° 32' S, 57° 54' W), ubicado a 30 Km al sur de la ciudad de Paysandú ubicada en el departamento de Río Negro, y el segundo en una zona cercana al arroyo Cangüé, departamento de Paysandú a 5 km de la EEMAC (32° 27' S, 58° 03' W) en un predio administrado por la empresa Agrosandú SRL. Este último experimento no llegó a cosecha, ya que la combinación de un suelo poco profundo, déficit hídrico y heladas ocurridas durante el mes de mayo de 2015 determinó la muerte de la totalidad de las plantas en zona donde se instaló el ensayo.

El sitio en el cual el ensayo llegó a cosecha (San Juan de Young) la variedad sembrada fue Rivette, la cual se sembró el 10 de mayo sobre un rastrojo de soja de primera, la población lograda media fue de 51 pl. m⁻². El ensayo fue instalado el 20 de mayo cuando el cultivo se encontraba emergiendo y dentro de la chacra se seleccionó un sitio homogéneo evitando cabeceras, desagües y zonas atípicas.

El experimento se realizó sobre un suelo clasificado como Brunosol subéutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, incluida dentro de la formación Fray Bentos.

3.1.1. Tratamientos aplicados

La primera fertilización se realizó el mismo día de la instalación del experimento, en la misma se aplicaron distintas combinaciones de los niveles de N y S, se aplicó además 46 kg de P₂O₅ y 60 kg de K₂O en todos los tratamientos con el objetivo de que estos nutrientes no sean limitantes para el crecimiento y desarrollo del cultivo, y que las variaciones en el rendimiento se deban exclusivamente a las distintas combinaciones de nitrógeno y azufre. En el estadio C1 se realizó el segundo aporte de nutrientes, en el cual el N fue aplicado en todos los tratamientos excepto en el testigo (Tratamiento 1). En cuanto al azufre, su aplicación se restringió a los tratamientos 5 y 6, N20-N60-S20-S10 y N80-N20-S20-S10 respectivamente.

Los tratamientos fueron combinaciones de 6 dosis de N (0, 40, 80, 100, 120, 160) y 3 dosis de S (0, 20 y 30) (Cuadro 4). El fraccionamiento de dosis total aplicada entre siembra y C1 intentó lograr distintas condiciones nutricionales entre tratamientos.

Cuadro 4. Dosis de N y S que recibió cada tratamiento.

Tratamientos	Instalación		C1		TOTAL	
	N	S	N	S	N	S
N0-N0-S0-S0	0	0	0	0	0	0
N20-N20-S0-S0	20	0	20	0	40	0
N20-N20-S20-S0	20	20	20	0	40	20
N20-N60-S20-S0	20	20	60	0	80	20
N20-N60-S20-S10	20	20	60	10	80	30
N80-N20-S20-S10	80	20	20	10	100	30
N40-N120-S30-S0	40	30	120	0	160	30
N40-N80-S30-S0	40	30	80	0	120	30

Las fuentes de fertilizantes utilizados fueron urea para nitrógeno (46% N), sulfato de amonio (21 % N, 24% S), superfosfato triple (0-46/46-0) y cloruro de potasio (0-0/0-60).

3.2. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.2.1. Muestreo de suelo

Al momento de la instalación y previo a la fertilización se tomaron muestras en cada bloque a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm). Cada muestra estaba compuesta por un total de 12 sub-muestras por profundidad. Estas muestras fueron analizadas para estimar pH (agua y KCl), contenido de N-NO₃, N-NH₄ y S-SO₄ (los datos de análisis se encuentran disponibles en los anexos). Posteriormente al estadio B4 se volvió a realizar un muestreo de suelo en los primeros 20 cm de profundidad, en esta oportunidad tomando una muestra por tratamiento la cual estaba compuesta por un total de 10 sub-muestras.

En todos los casos las muestras fueron secadas a 40°C durante 48 horas en estufa de aire forzado previo al envío a laboratorio.

3.2.2. Muestreo de biomasa y rendimiento

En cada uno de los tratamientos se realizaron 4 determinaciones de biomasa: 4 hojas verdaderas desplegadas (B4), elongación (C1), plena floración (F2) y cosecha. Se cortó 1 metro lineal entre 2 surcos en cada uno de los tratamientos (0,38 m²), registrándose en cada caso el número de plantas. A cosecha el procedimiento fue el mismo variando en este caso los metros cosechados (6 metros lineales del centro de cada

parcela – 1,14 m²), y que además se contabilizó el número de silicuas por unidad de superficie.

La totalidad de las muestras fueron secadas a estufa a 60°C hasta masa constante, y para el caso del muestreo a cosecha, este secado facilitó la trilla.

Cuadro 5. Fecha y estadio del cultivo al momento de los muestreos realizados.

Fecha	Estadio	Actividad
17/05/2015	Emergencia	Instalación del ensayo. Muestreo de suelo. Toma de muestras de 0-20cm y 20-40cm.
11/06/2015	B3-B4	Muestreo de suelo y planta. Corte de biomasa, y conteo de número de plantas. Muestreo de suelo de 0-20cm.
20/07/2015	C1-C2	Corte de biomasa y conteo de número de plantas.
01/09/2015	F2-G1	Corte de biomasa y conteo de número de plantas.
09/10/2015	Cosecha	Corte de biomasa y conteo de número de plantas.

3.2.3. Trabajo de laboratorio

3.2.3.1. Análisis de suelo

Al momento de la instalación del ensayo y en el estadio B4 las muestras fueron analizadas para obtener el dato de pH (agua y KCl), nitratos, amonios y sulfatos.

3.2.3.2. Análisis de biomasa y granos, y componentes del rendimiento

En los estadios B4, C1, floración y cosecha la muestra de biomasa fue utilizada para determinar el contenido total de nitrógeno y azufre, y por tanto estimar la absorción de dichos nutrientes en cada tratamiento. Para la muestra a cosecha se analizó de forma separada el contenido de nitrógeno y azufre en grano del ubicado en la biomasa. El % nitrógeno se determinó por el método Kjeldhal.

A partir de la curva de dilución para nitrógeno y azufre, y la cantidad de biomasa acumulada al estadio C1 fue posible determinar el nivel crítico de dichos nutrientes. Si la concentración actual de nitrógeno y/o azufre es inferior al nivel crítico se considera que la concentración de dichos nutrientes es limitante para el crecimiento

(nitrógeno limitante, limitante), en cambio si la concentración es igual o mayor al crítico el cultivo se encuentra en condición no limitante para nitrógeno y/o azufre.

Los componentes del rendimiento que fueron medidos son: el número de granos por unidad de superficie, peso de grano, silicuas por planta y grano por silicua. Mediante el peso promedio de 300 granos en 3 series de 100 granos se estimó el peso de mil granos. El número de granos por superficie fue determinado mediante la relación entre el rendimiento y el peso de grano. Se contabilizó la cantidad de silicuas por planta, y a partir de este dato fue posible obtener el número de granos por silicua. El índice de cosecha de grano se calculó como la relación entre el rendimiento en grano y la biomasa aérea total para cada tratamiento.

A su vez los granos fueron utilizados para estimar en el laboratorio de Calidad de Granos de INIA el % de materia grasa, la determinación fue realizada a través del método indirecto. Se realizó la determinación de contenido de aceite (%) en grano para cada parcela, expresado como porcentaje de materia grasa (%MG); luego fue multiplicado por el rendimiento en grano a los efectos de calcular el rendimiento de aceite (kg ha^{-1}).

3.3. EFICIENCIA DE USO DE LOS NUTRIENTES

Se calcularon diferentes eficiencias tanto para nitrógeno como para azufre. Para el cálculo de la eficiencia de uso de nitrógeno y azufre se tomó en cuenta el rendimiento en grano, la absorción y disponibilidad de ambos nutrientes. La absorción fue determinada a partir de la concentración de cada nutriente en la biomasa y en grano. La cantidad de nitrógeno y azufre disponible consta de la suma del disponible en el suelo (0-40cm de profundidad) al momento de la instalación del ensayo y del agregado vía fertilizante.

A partir del valor de N y S del análisis de suelo se calcularon los kg de estos nutriente de 0-20cm y 20-40cm que se encontraban disponible en el suelo, para dicho calculo se consideró una densidad aparente de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$, siendo este el promedio para los suelos del Uruguay. El análisis de suelo tiene como resultado la cantidad de nutriente (expresado en μg) por gramo de suelo.

El cálculo para obtener la disponibilidad de nutriente es el siguiente:

$$\text{Volumen de 1 ha: } 100\text{m} \times 100\text{m} \times 0,20\text{m} = 2.000\text{m}^3$$

$$\text{Dap: } 1,25 \text{ g/cm}^3 \times 1000 = 1.250 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso de 1 ha: } 2.000 \text{ m}^3 \times 1.250 \text{ kg/m}^3 = 2.500.000 \text{ kg}$$

1 $\mu\text{g N/g}$ suelo equivale a 1kg de N cada 1.000.000 kg de suelo

$$2.500.000 \text{ kg} / 1.000.000 \text{ kg} = 2,5$$

Por lo tanto: al multiplicar el dato de análisis de suelo por 2,5 se obtiene la cantidad de N o S disponible por hectárea cuando la profundidad considerada es de 0 a 20cm

Para el estrato correspondiente a la profundidad 20-40cm el cálculo a realizar es idéntico. En este caso se debió considerar también una Dap de $1,25 \text{ g/cm}^{-3}$ ya que no se contaba con un dato más preciso.

Las eficiencias determinadas fueron:

i. Eficiencia agronómica de uso (EAUN y EAUS) estimada como la relación entre el rendimiento y la cantidad de nitrógeno y azufre disponible (suelo + fertilizante).

$$\text{EAUN} = \text{kg grano/kg de N disponible}$$

$$\text{EAUS} = \text{kg grano/kg de S disponible}$$

ii. Eficiencia fisiológica de uso (EFUN y EFUS) estimada como la relación entre el rendimiento y la cantidad de nitrógeno y azufre absorbido.

$$\text{EFUN} = \text{kg de grano/ kg de N absorbido}$$

$$\text{EFUS} = \text{kg de grano/ kg de S absorbido}$$

iii. Eficiencia de absorción (EAN y EAS) estimada como la relación entre la cantidad de nutriente absorbido y el disponible por el cultivo.

$$\text{EAN} = \text{kg de N absorbido/kg de N disponible}$$

$$\text{EAS} = \text{kg de S absorbido/kg de S disponible}$$

iv. Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN)

$$\text{EUN} = (\text{rendimiento parcela} - \text{rendimiento testigo})/\text{UN agregadas}$$

Debe mencionarse que no se consideraron aportes de S y N por mineralización de la materia orgánica ya que no se disponía del dato de contenido de materia orgánica del suelo.

3.4. BALANCE HÍDRICO DEL CICLO DEL CULTIVO

Para conocer bajo qué condiciones hídricas se desarrolló el cultivo es que se realizó un balance hídrico, el mismo se compone de las ganancias por las precipitaciones y, las pérdidas de agua a través de la evapotranspiración (ET), y al proceso de infiltración y de escurrimiento de los suelos.

Para realizar el cálculo fue necesario contar con los siguientes datos morfológicos, físicos y químicos: el espesor de los horizontes (expresado en centímetros), el contenido porcentual de las fracciones granulométricas del suelo (arena, limo y arcilla) y el porcentaje de carbono orgánico, que se traduce en porcentaje de materia orgánica. El producto final del balance hídrico es el agua potencialmente disponible neta (ADPN), dicho valor se expresa en milímetros. Dado que no se contaba con una descripción del suelo, se utilizó el suelo tipo de la unidad cartográfica a la que pertenece dicho suelo.

Se calcularon los contenidos de humedad en equilibrio con las tensiones correspondientes a 1/10 atmósfera (Capacidad de Campo - CC), a 15 atmósferas (Coeficiente de Marchitez Permanente - CMP) a partir de contenidos porcentuales en peso de arena, limo, arcilla y materia orgánica de los horizontes del suelo.

Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$CC/10(\text{Horizontes A no arenosos}) = 21,977 - 0,168(\text{Ar \%}) + 2,601(\text{M.O \%}) + 0,127(\text{Ac \%})$$

$$CC/10\text{cm} (\text{Horizontes B}) = 18,448 - 0,125(\text{Ar \%}) + 1,932(\text{MO \%}) + 0,295 (\text{Ac \%})$$

$$CMP /10 \text{ cm} (\text{Horizontes A o B}) = - 58,1313 + 0,3718(\text{M.O. \%}) + 0,5682(\text{Ar \%}) + 0,6414 (\text{L \%}) + 0,9755 (\text{Ac \%})$$

En estas fórmulas, la arena (Ar), el limo (L), la arcilla (Ac) y la materia orgánica (M.O.) se expresan en porcentajes.

Una vez obtenidos los parámetros CC y CMP, se restó a los valores de CC los correspondientes a CMP para obtener el contenido potencial de almacenamiento de agua en peso para los diversos horizontes ($ADH = CC - CMP$).

Para realizar el balance hídrico se utilizaron como supuesto que a inicio del ciclo del cultivo el suelo se encontraba a capacidad de campo. Las precipitaciones ocurridas cuando el suelo no estaba a capacidad de campo fueron consideradas como

efectivas, y al completar el almacenaje del suelo en cambio las mismas se consideraron como escurrimiento superficial.

3.5. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

El diseño experimental fue de bloques completos al azar (DBCA), con 8 tratamientos y 3 repeticiones. Cada tratamiento fue representado por una parcela de 6 surcos de ancho y 10m de largo.

Diseño experimental: bloques completos al azar (DBCA)

Modelo: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + p_j + \varepsilon_{ij}$

Donde:

Y_{ij} : variable aleatoria observada (kg ha^{-1})

μ : media general "conceptual"

τ_i : efecto del i-ésimo tratamiento

p_j : efecto del j-ésimo bloque

ε_{ij} : variable aleatoria no observada, error experimental

Siendo: $i: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$

$j: 1, 2, 3$

Supuestos del modelo:

ε_{ij} : variables independientes e idénticamente distribuidas (IID), se distribuye normalmente.

H_0 : los tratamientos son todos iguales: $t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = t_5 = t_6 = t_7 = t_8$

H_a : existe al menos una diferencia entre tratamientos.

Se realizaron descripciones estadísticas (media, máximo, mínimo, coeficiente de variación) para las variables rendimiento, biomasa, índice de cosecha, materia grasa. A su vez para los componentes numéricos también se le realizaron las mismas descripciones estadísticas.

Para evaluar el efecto de los tratamientos se realizaron análisis de varianza y se evaluó el efecto tratamiento mediante un test de LDS Fisher, usando 0.05 nivel de significancia.

Mediante la utilización del software estadístico Jump se realizó un árbol de regresión y clasificación para rendimiento en grano y sus componentes numéricos. Lo mismo se realizó para rendimiento en grano y cantidad de N y S absorbidos durante el ciclo del cultivo. Esta técnica estadística permite formar grupos en función de variables predictoras.

Se calcularon las eficiencias agronómicas, fisiológicas, de absorción y de uso del nitrógeno y azufre. Con dichas eficiencias se realizó un análisis de varianza y se buscó diferencias entre tratamientos mediante un test LDS Fisher.

Por último, se estudiaron regresiones entre variables y se analizaron a partir de análisis de varianza de la regresión.

Cuando se realizó análisis de varianza y comparación de medias entre tratamientos los datos fueron analizados con el software estadístico Infostat versión estudiantil 2015 (Di Rienzo et al., 2015).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

La importancia de conocer las características climáticas del año del experimento aportó datos importantes para analizar con más profundidad los ensayos de fertilización sobre el campo, ya que estas condiciones afectan tanto el desarrollo como el rendimiento del cultivo, considerándose variables como la temperatura, radiación, el volumen de las precipitaciones y la distribución de las mismas fundamentales en la formación y concreción del rendimiento.

La zafra invernal del 2015 (comprendida por los meses de mayo a octubre) se caracterizó por poseer un régimen de precipitaciones superior al promedio histórico, siendo un 12% superior a la media histórica 2002-2014 (653mm vs 581mm) aunque su distribución fue irregular. Gómez y Cepeda (2010) sostienen que un cultivo de canola puede consumir entre 450 y 550 mm para alcanzar su máximo rendimiento, por lo tanto, el total de lluvias podría considerarse aceptable.

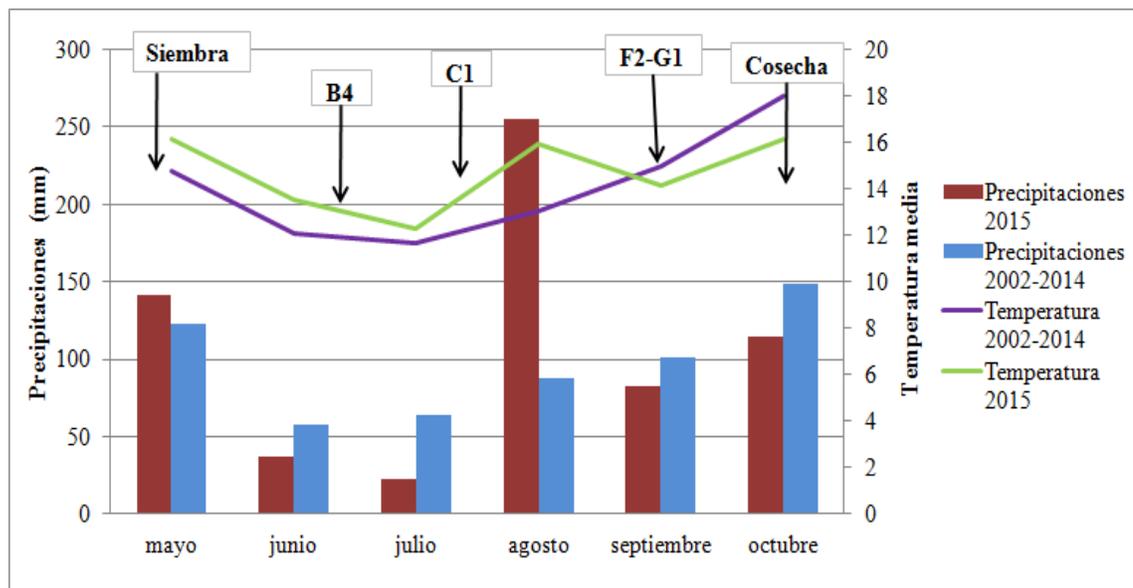


Figura 1. Régimen pluviométrico y temperatura mensual de la serie histórica (2002-2014) y año del ensayo (2015) para Paysandú.

Si bien las precipitaciones acumuladas durante ensayo fueron consideradas aceptables por superar la cantidad de agua transpirada por un cultivo cuando se encuentra en condiciones de bienestar hídrico, resta analizarlas más en profundidad para poder saber si las mismas fueron aprovechadas por el cultivo, y así conocer si sufrió deficiencias hídricas durante su ciclo, y en qué momento ocurrieron las mismas.

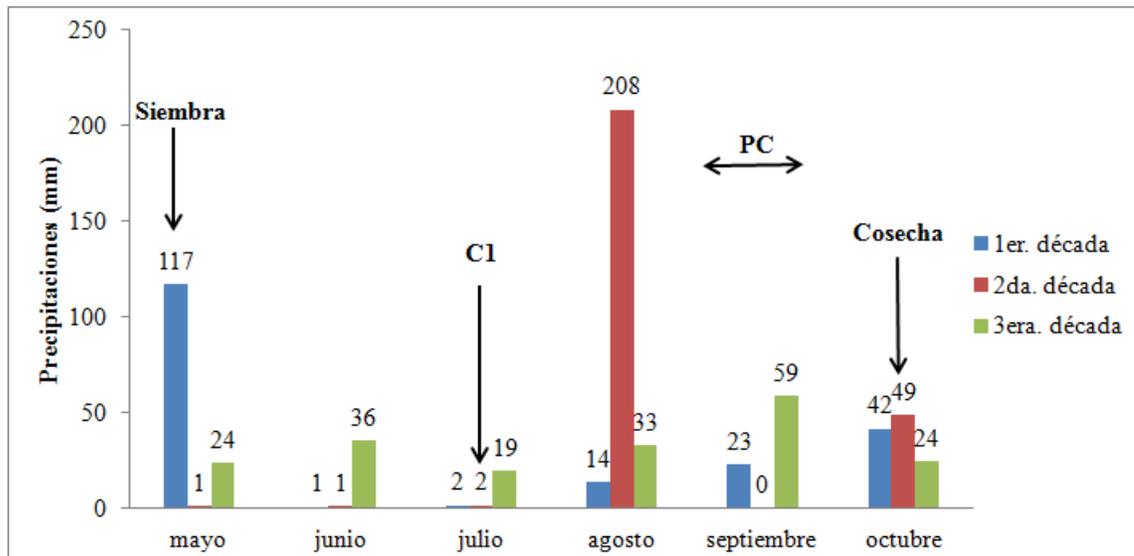


Figura 2. Precipitaciones decádica posterior al 1 de mayo de 2015 y ubicación de los momentos más relevantes del ciclo del cultivo (siembra, C1, PC y cosecha).

Al analizar las precipitaciones mensuales puede observarse lo irregular de las mismas de parte del año 2015. Durante los meses de junio y julio precipitaron sólo 61mm, contrastando con la segunda década del mes de agosto en la cual el volumen más que triplicó a los meses anteriores. El escaso volumen de precipitaciones durante los meses de junio y julio hacen suponer que el cultivo se haya desarrollado bajo condiciones de humedad en el suelo sub-óptimas (Figura 3). Según el balance hídrico realizado por el portal INIA GRAS el mes de menor contenido de agua en el suelo durante el ciclo del cultivo fue junio con el 60% (disponible en página web de INIA). La desventaja que presenta el mismo es que la metodología utilizada tiene como supuestos que la vegetación de cobertura es una pastura de gramínea, la cual intercepta el 100% de la radiación incidente y que la capacidad de almacenaje del suelo puede no ser similar al suelo donde se llevó a cabo el ensayo ya que se toma en cuenta para el análisis una capacidad de almacenaje promedio dentro de una gran heterogeneidad de suelos.

Con el objetivo de tener una mayor aproximación a la disponibilidad hídrica bajo la cual se desarrolló el cultivo es que se realizó un balance hídrico (datos no presentados). A partir del mismo pudo determinarse que de los 162 días del ciclo, 39 días coincidieron con una disponibilidad hídrica en el suelo menor al 60% de la capacidad de almacenaje, es decir, el 24% del ciclo ocurrió con un índice de bienestar hídrico insuficiente para que el cultivo exprese su máximo potencial de rendimiento (Figura 3). Se toma como referencia un 60% ya que el valor de “p” para canola es de 0,60 siendo este valor la fracción de agua disponible máxima que se puede agotar sin que se produzcan síntomas de estrés hídricos (Allen et al., 2006). En contraparte, se

estimaron sólo 5 días con escorrentía por lo tanto es probable que el cultivo no haya sufrido condiciones de exceso hídrico. El suelo presenta una capacidad de almacenaje de agua moderadamente alta, ya que el agua disponible calculada se encuentra dentro del rango que va de 71 a 120mm, con una capacidad de almacenaje de 89mm.

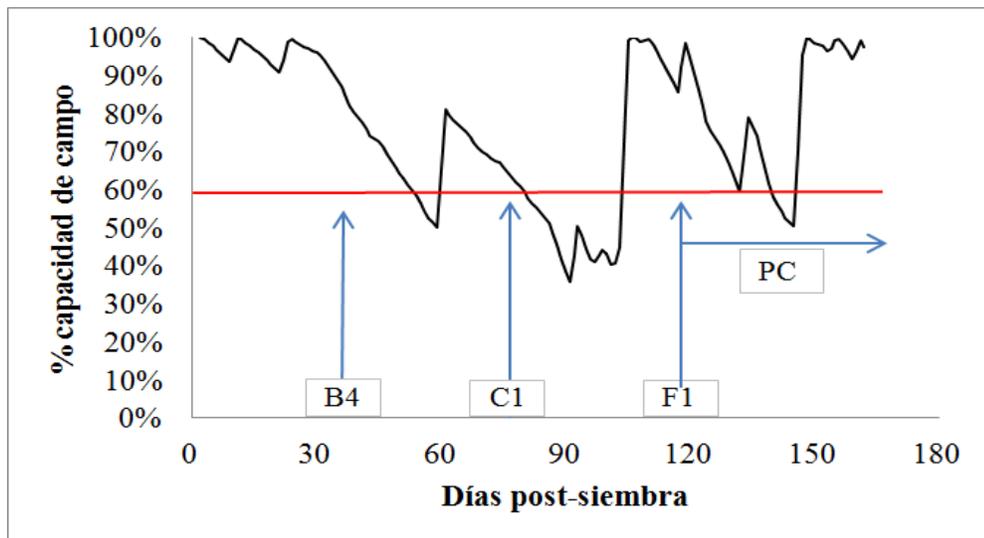


Figura 3. Porcentaje de agua respecto a la capacidad de campo, estimado a partir del balance hídrico.

Durante el ciclo del cultivo ocurrieron tres períodos de deficiencias hídricas. De por sí, estas deficiencias estarían provocando un menor crecimiento lo que ocasionaría una reducción en el rendimiento, y el momento en el cual ocurren las mismas determinaría la magnitud de las pérdidas. Deficiencias hídricas en el período crítico de concreción de rendimiento, momento en el cual se definen los principales componentes no tendría otro resultado que una caída importante en los rendimientos logrados.

El período de deficiencia más severo ocurrió a partir del día 79 post-siembra y se prolongó por 24 días consecutivos. Fue durante este lapso que se realizó la segunda aplicación de fertilizante (estadio C1), y se presume que la no ocurrencia de precipitaciones hasta de 12 días de aplicado el fertilizante provocó que los nutrientes no se hayan incorporado en el momento pretendido. La segunda restricción hídrica severa coincidió con la tercera semana post-floración (PC: 3 semanas siguientes a inicio de floración) por lo que el rendimiento estaría limitado debido a la reducción del recurso agua.

La temperatura y radiación también son factores ambientales que tienen efectos muy importantes sobre los procesos que ocurren dentro de las plantas, por lo que es necesario analizar cómo pueden haber influido dichos factores sobre el cultivo. En la

Figura 4 se puede observar la temperatura y radiación mensual de la serie histórica y el año del ensayo.

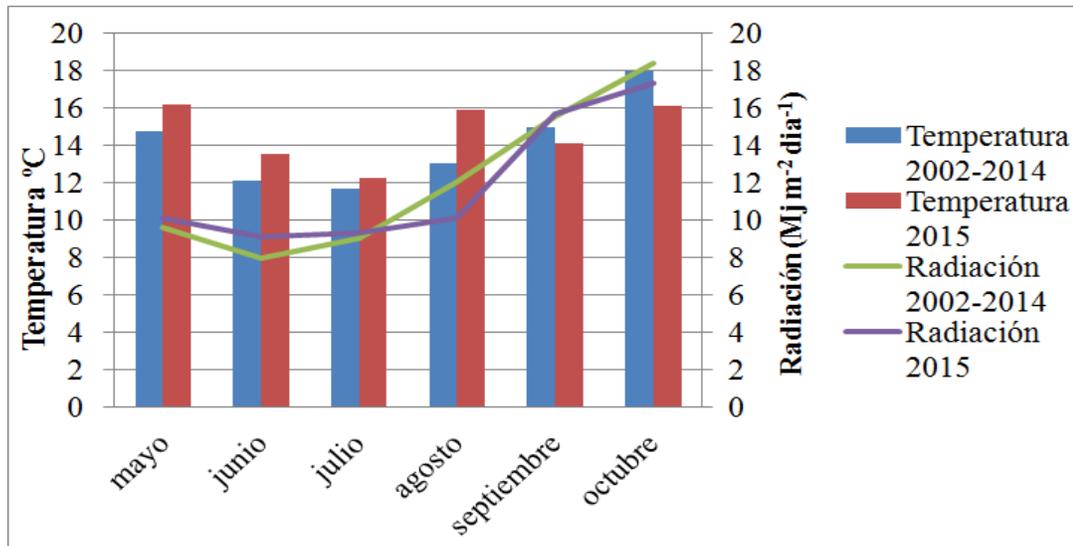


Figura 4. Comparación de radiación y temperatura media mensual de la serie histórica (2002-2014) con la del ensayo (2015).

En cuanto a la temperatura media registrada durante el ensayo, fue superior a la serie histórica desde inicio del ciclo del cultivo hasta el mes de agosto, a partir de dicho mes la tendencia se invirtió siendo menor la serie histórica. Según Si y Walton (2004), Agosti (2011) las condiciones ambientales durante la etapa de post-floración permitieron identificar a la temperatura media promedio como el factor ambiental de mayor influencia sobre las variables de rendimiento y calidad de grano. Si y Walton (2004) registraron una caída promedio 289 kg ha^{-1} por cada $^{\circ}\text{C}$ por encima de $11,5$ durante la etapa post-floración, por lo cual podría sugerirse que la temperatura influyera negativamente sobre el rendimiento, ya que la temperatura promedio dicha etapa fue de 15°C (Figuras 1 y 4).

Por su parte, desde la siembra hasta el mes de julio la radiación fue mayor para el año 2015 que para la serie de años comprendidos entre 2002 y 2014, a partir del mencionado mes se invierte la tendencia. Al tomar en cuenta la radiación acumulada durante el ciclo del cultivo puede decirse que fue tan sólo 1,5 % inferior a la serie histórica, valor que puede considerarse poco significativo. Sin embargo, para el mes de agosto la radiación para el año 2015 fue 20% inferior para el mismo mes de la serie histórica, lo cual pudo haber influido negativamente sobre el rendimiento. En el mencionado mes ocurrieron 9 eventos de precipitación, lo cual determinó una mayor nubosidad y por ende una menor radiación recibida por parte del cultivo.

La información presentada permite concluir que el ciclo del cultivo en el año 2015 puede considerarse sin mayores desvíos de la media en lo que a régimen térmico se refiere, la temperatura promedio para el ensayo fue de 15 °C, siendo una unidad superior al promedio para la serie de años 2002-2014. En cuanto a las precipitaciones, las ocurridas durante ensayo fueron levemente superiores a la serie histórica, sin embargo, la distribución de las mismas afectó negativamente ya que no estuvieron presentes en períodos importantes para el cultivo, lo cual seguramente comprometió los rendimientos alcanzados.

4.2. RESULTADOS GENERALES DEL ENSAYO

En este capítulo se analizarán los datos obtenidos en el ensayo. Los efectos de los nutrientes N y S en el desarrollo y el rendimiento del cultivo, la interacción entre ellos, las eficiencias logradas por tratamiento y los componentes del rendimiento. Todas las variables mencionadas serán analizadas estadísticamente para saber la significancia de los valores comparados.

Para el año del ensayo, las condiciones climáticas y su relación con las características del sitio experimental determinaron que el rendimiento medio estuviera alejado del potencial de la especie, alcanzando en términos medios sólo 1647 kg ha⁻¹ con diferencias importantes entre tratamientos.

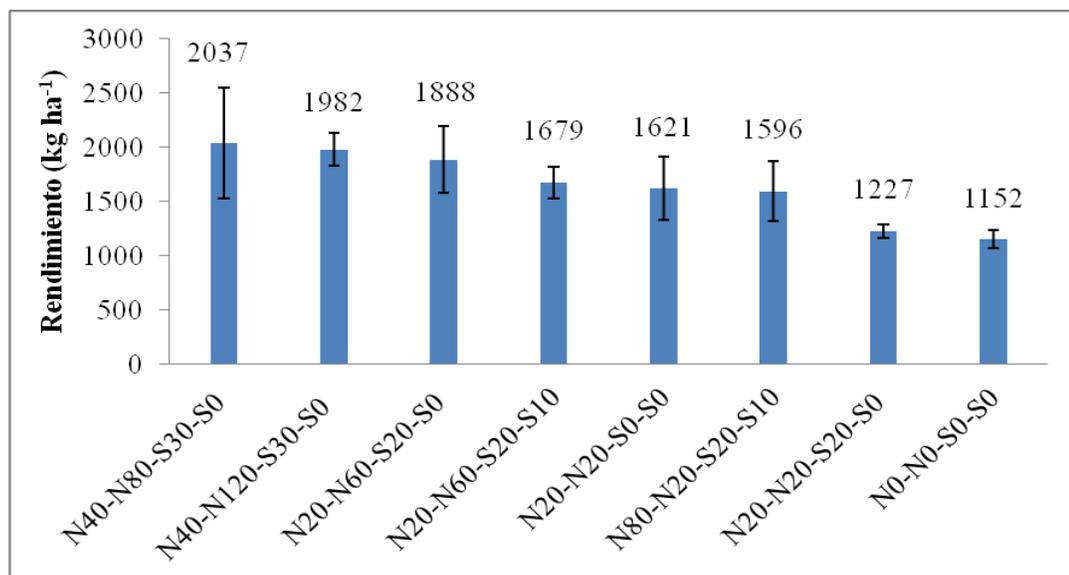


Figura 5. Rendimientos medios según tratamiento aplicado.

En general se observó una importante variabilidad en los rendimientos alcanzados los cuáles variaron entre 1005 kg ha⁻¹ obtenido por una repetición del

tratamiento N0-N0-S0-S0 y un máximo de 2945 kg ha⁻¹ logrado en el tratamiento N40-N80-S30-S0. Cuando se analizan las diferencias estadísticas entre los diferentes tratamientos, fue posible diferenciar el N40-N80-S30-S0 de los tratamientos N20-N20-S20-S0 y N0-N0-S0-S0 (Figura 5; P>0,05), los cuales tuvieron un rendimiento medio de 2037 kg ha⁻¹, 1227 kg ha⁻¹ y 1152 kg ha⁻¹ respectivamente. También fue posible diferencias estadísticamente el N40-N120-S30-S0 del N0-N0-S0-S0, sus respectivas medias fueron de 1982 kg ha⁻¹ y 1152 kg ha⁻¹. Sin embargo, en general puede observarse que en los valores absolutos los tratamientos que recibieron un mayor aporte de nitrógeno fueron los que obtuvieron un rendimiento más alto.

Cuadro 6. Valores medios y variabilidad del estadio nutricional del cultivo, producción de biomasa, % MG, aceite logrado por hectárea y rendimiento en grano obtenidos a partir del experimento.

Variable	Media	E.E.	CV (%)	Mín.	Máx.
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	1648	101	30	1005	2946
Biomasa a cosecha (kg ha ⁻¹)	5689	291	25	3772	9237
Materia grasa (%)	46	0,46	4,9	43	51

El porcentaje de materia grasa varía poco coincidiendo con los datos por Adrover y Ferreira (2012), para el ensayo el promedio fue de 46,2%, el mínimo fue de 42,7% y el máximo de 51,4% para los tratamientos N20-N60-S20-S0 y N80-N20-S20-S10 respectivamente. El aceite producido varió entre 489 kg ha⁻¹ obtenido por el N0-N0-S0-S0 y 1332 kg ha⁻¹ por el N40-N80-S30-S0, con una media general de 758 kg ha⁻¹. Lo que indica que la variable que más afecto la cantidad de aceite por superficie fue el rendimiento.

Tal como es mencionado en bibliografía la producción de materia seca en el cultivo de colza repercute directamente sobre el rendimiento, lo que pudo confirmarse al comparar los valores obtenidos para dichas variables con los reportados en otros ensayos. La biomasa promedio a cosecha para el presente ensayo fue de 5689 MS ha⁻¹, siendo este valor inferior a los reportados por Planchón y Figares (2004), Adrover y Ferreira (2012) quienes mencionan valores de 13488 y 6750 k MS ha⁻¹, respectivamente. La diferencia en rendimiento para los ensayos mencionados fue proporcional a la de la biomasa ya que el índice de cosecha para la especie en cuestión es muy estable; es decir el bajo rendimiento alcanzado se debió a la escasa producción de materia seca.

Además de haber obtenido una escasa producción de materia seca, el presente ensayo tuvo la particularidad de tener un muy lento crecimiento inicial) lo que determinó que al estadio C1 se alcanzara tan sólo el 22% (1270 MS ha⁻¹) de la materia seca producida a cosecha (5690 MS ha⁻¹). Adrover y Ferreira (2012) mencionan valores de

materia producida a C1 que representan el 35% del total a cosecha, lo que da la pauta que el bajo rendimiento del presente ensayo se debió en parte a que el cultivo no logró producir cantidades importantes de materia seca a cosecha ya que estaba condicionado por las muy bajas tasas de crecimiento ocurridas al inicio del ciclo del cultivo (datos presentados en anexos).

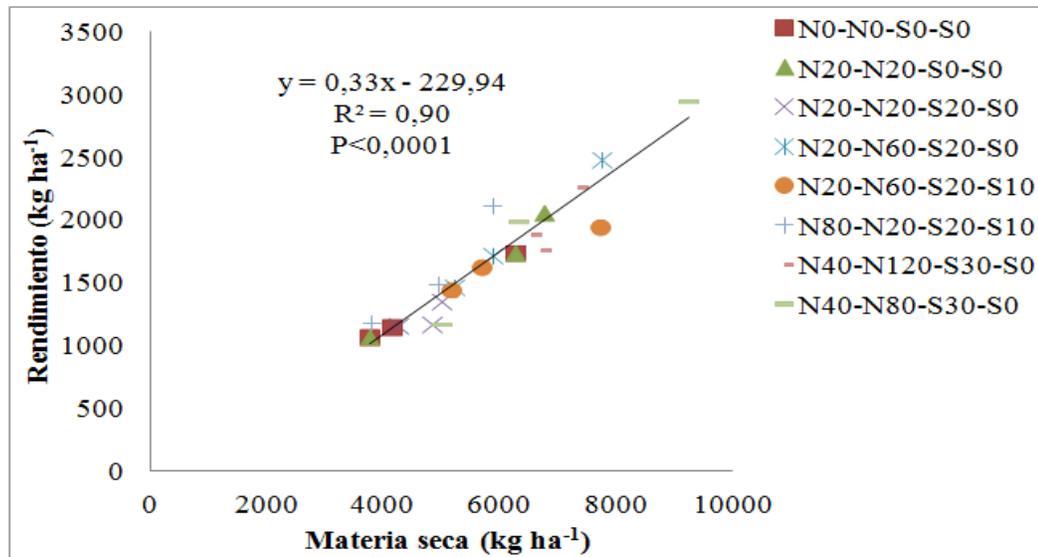


Figura 6. Relación entre la biomasa total a cosecha y el rendimiento en grano.

Puede observarse que aumentos en la biomasa acumulada provocan incrementos directamente proporcionales de rendimiento, por lo que se desprende que el índice de cosecha se mantiene estable para un amplio rango de rendimientos logrados. Puede verse en la línea de tendencia, que los tratamientos con una mayor oferta nutricional se ubicaron en la parte superior de la misma, y por tanto lograron un rendimiento más elevado (Figura 6).

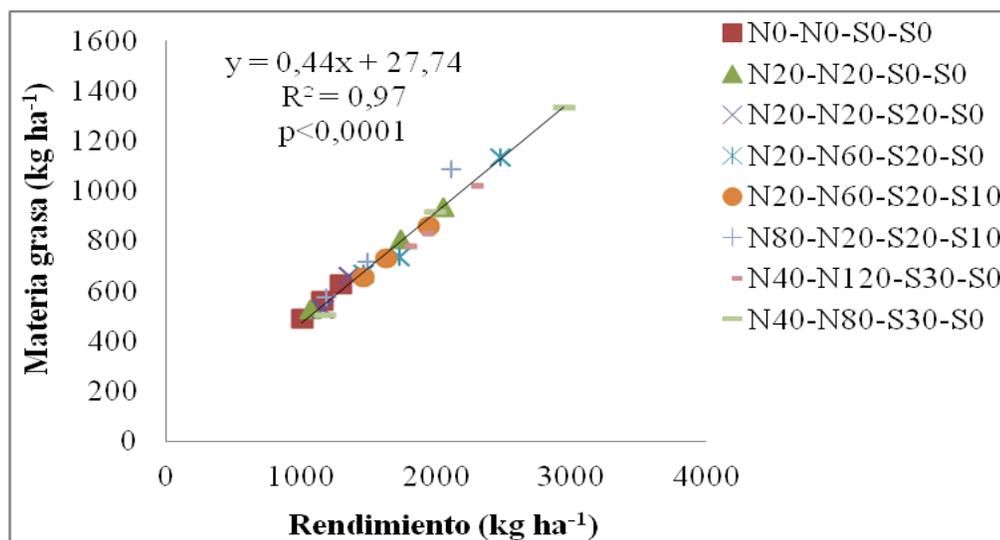


Figura 7. Materia grasa producida (kg ha^{-1}) en función del rendimiento (kg ha^{-1}).

La materia grasa aumentó de forma lineal frente a incrementos en el rendimiento, esto se explica debido a que el contenido de aceite no se encuentra relacionado con el rendimiento y se mostró muy estable entre tratamientos, confirmando que la variable más importante para aumentar la materia grasa por hectárea es el rendimiento en grano (Figura 7).

4.3. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

Conocer la influencia de cada uno de los componentes numéricos del rendimiento y su variación frente a cambios en la disponibilidad de nutrientes es fundamental para un adecuado manejo del cultivo si el objetivo es lograr altos rendimientos, es por esto que en la presente sección se mostraran los resultados obtenidos en los tratamientos evaluados y sus efectos.

Cuadro 7. Valores medios y variabilidad de los principales componentes numéricos del rendimiento.

Variable	Media	E.E.	CV (%)	Mín.	Máx.
Silicuas m^{-2}	2769	158	28	1446	4617
Granos m^{-2}	47901	3451	35	26224	97108
Peso de grano (gr)	3,49	0,06	8,4	2,93	4,0
Índice de cosecha (IC)	0,29	0,01	9,6	0,24	0,36

A partir del cuadro puede saberse que el índice de cosecha y el peso de grano presentaron muy poca variabilidad, siendo para ambas variables el coeficiente de variación menor al 10%. En contraparte, el número de granos y silicuas por m^{-2} presentan un coeficiente de variación cercano a 30% lo que indica su alta relación con las diferencias en rendimiento encontradas (Cuadro 7).

En términos medios se generaron 2800 silicuas m^{-2} , valor que representa tan sólo el 35% de los reportados por Adrover y Ferreira (2012). A su vez estos mismos autores reportaron en promedio 177.000 granos m^{-2} , valor que triplica lo obtenido en este trabajo y por tanto marca la diferencia en rendimientos entre ambos experimentos.

Por otro lado, el peso medio de grano fue de 3,5 gr, variando entre 2,9 y 4,0 gr, valor superior a los reportados por Agosti (2011), Adrover y Ferreira (2012), cuyos promedios fueron 2,95 y 3,2, respectivamente. Este hecho puede explicarse por el menor número de fosas disponible para llenar.

En cuanto al índice de cosecha, el mismo obtuvo un promedio de 29%, un valor similar a los reportados por Habekotté (1997), Tamagno y Chamorro (2004), Agosti (2011), Adrover y Ferreira (2012). Este hecho, puede indicar que el bajo rendimiento final se debió a la escasa acumulación de materia seca ya que el IC es bastante estable. Debido a la estabilidad del índice de cosecha la forma de aumentar los rendimientos es a través de una mayor producción de biomasa; un claro ejemplo de esto es que N40-N80-S30-S0 fue la que produjo la mayor cantidad de materia seca y tuvo el rendimiento más alto del ensayo.

Con el objetivo de conocer cómo influye cada uno de los componentes numéricos sobre el rendimiento del cultivo es que se realizó un árbol de clasificación y regresión, en el cual se analizó la variación del rendimiento en función de los componentes numéricos del rendimiento (Figura 8).

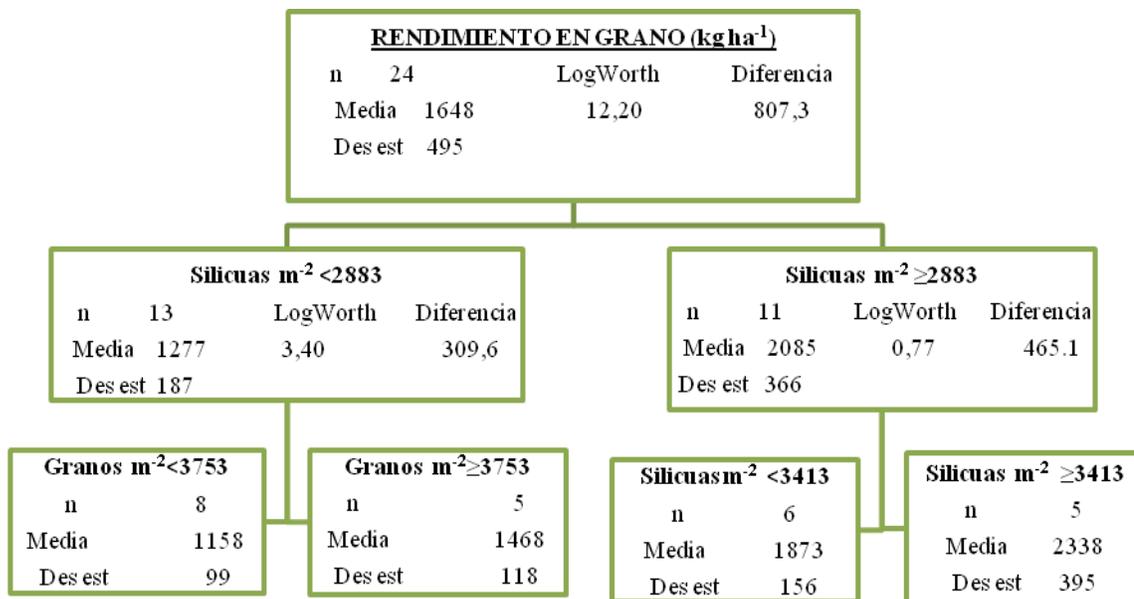


Figura 8. Árbol de clasificación para componentes numéricos del rendimiento.

El componente numérico que determinó en mayor medida las variaciones del rendimiento fue el número de silicuas por metro cuadrado. La división se marcó a partir de las 2883 silicuas m⁻². De las 24 parcelas, 13 no superaron ese valor obteniendo un rendimiento medio de 1277 kg ha⁻¹, las restantes 11 parcelas rindieron en promedio 2084 kg ha⁻¹. El grupo con menor número de silicuas por metro cuadrado se dividió en base a los granos m⁻². El grupo que superó los 3752 granos m⁻² fue el grupo de mayor rendimiento con una media de 1468, en cambio los que no superaron dicha cantidad de granos promediaron 1158 kg ha⁻¹.

Dentro del grupo con mayor número de silicuas por metro cuadrado la división entre el grupo de bajo y alto rendimiento no se diferenció estadísticamente (el LogWorth tomo un valor de 0,77) pero se pudo observar la tendencia que el componente de mayor influencia dentro de este grupo volvió a ser cantidad de silicuas m⁻². Las 11 parcelas se dividieron en 6 que tuvieron un rendimiento medio de 1873 kg ha⁻¹ con un número de silicuas inferior a 3413 m⁻². Las parcelas que superaron dicho valor rindieron en promedio 2338 kg ha⁻¹, siendo el grupo de mayor rendimiento dentro de todo el ensayo. Al igual que ocurre con la mayoría de los cultivos, las diferencias en rendimiento esta explicada por la diferencia en el número de granos (Figura 9), que para este cultivo en particular se asocian a la cantidad de silicuas fijadas (Figura 10).

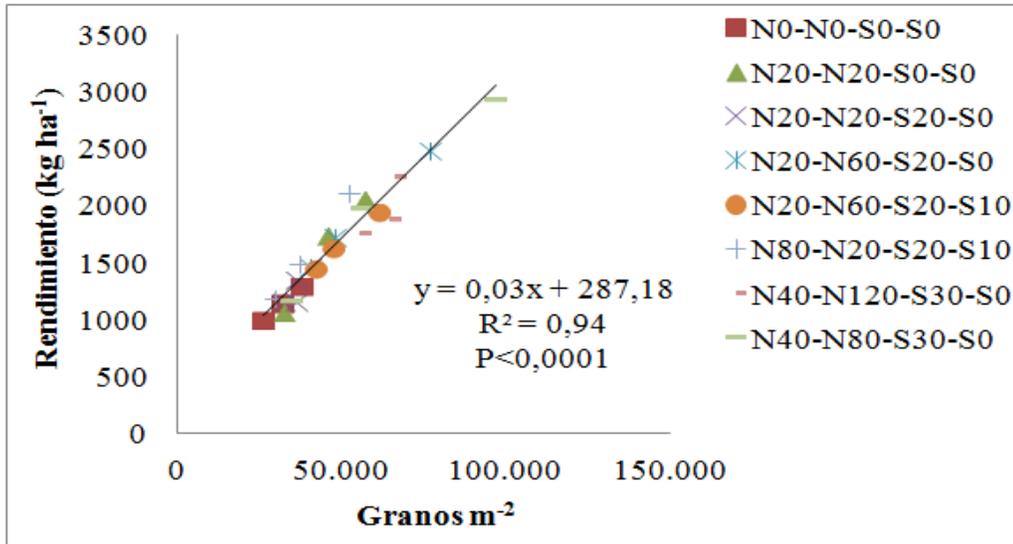


Figura 9. Relación entre rendimiento en grano y número de granos m⁻².

Aumentos en el número de granos m⁻² conllevan incrementos en el rendimiento. Como lo muestra el gráfico, dentro del rango estudiado el aumento del rendimiento es lineal y positivo ante aumentos en el número de granos m⁻², siendo este uno de los componentes más importantes a tener en cuenta para aumentar el rendimiento final. La relación encontrada en este trabajo fue muy similar a la obtenida por Aguirre y Uriarte (2010), siendo el coeficiente de determinación de 94 y 95% respectivamente, y muy superior al 32% obtenido por Adrover y Ferreira (2012). En una revisión realizada por Agosti (2011) se menciona que los trabajos en los que se observaron incrementos del rendimiento por agregado de N, el componente que mejor explicó las diferencias en rendimiento fue el número de granos por unidad de superficie.

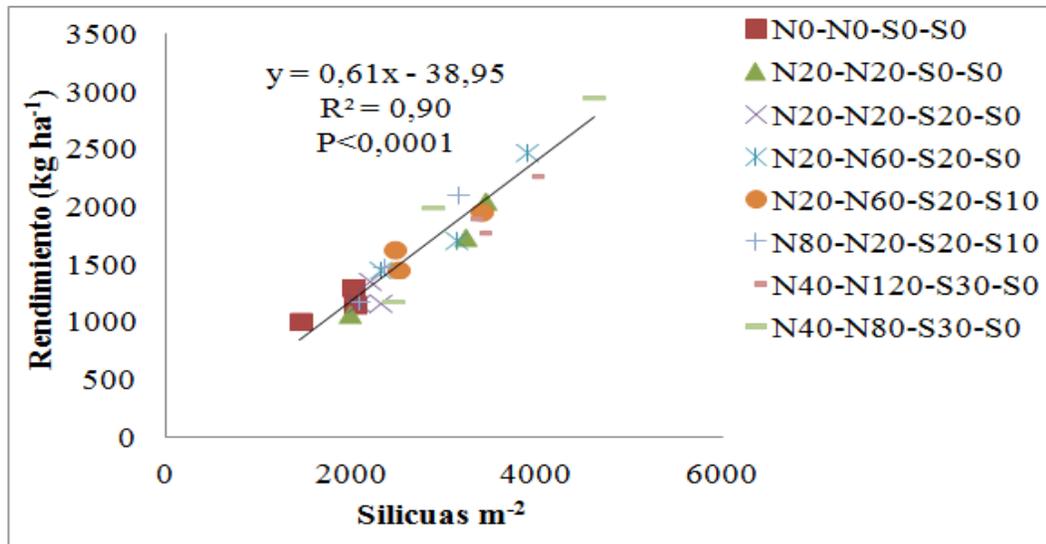


Figura 10. Relación entre rendimiento en grano y número de silicuas m^{-2} .

La relación del número de silicuas con el rendimiento es lineal y positiva, el número de silicuas es afectado por el índice nutricional y las condiciones climáticas. Cuando estas variables son favorables el número de silicuas m^{-2} aumenta siendo acompañada por aumentos en el rendimiento. Lo mencionado anteriormente es coincidente con lo reportado por Agosti (2011), quien afirma que aumentos en el número de silicuas y número de granos m^{-2} conllevan a aumentos en el rendimiento.

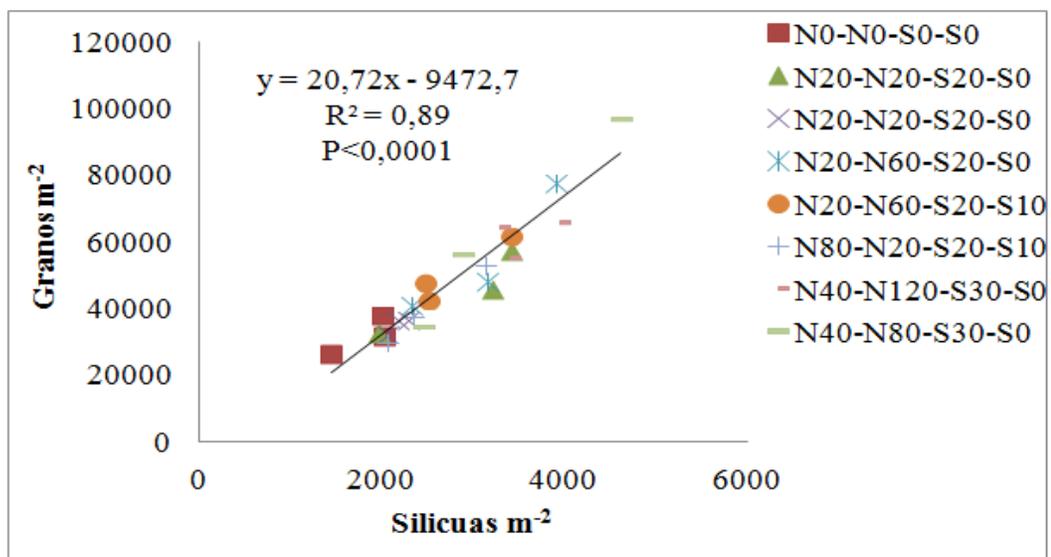


Figura 11. Relación entre el número de granos m^{-2} y número de silicuas m^{-2} .

Si combinamos los componentes granos m^{-2} y silicuas m^{-2} puede apreciarse que tienen una relación lineal y positiva. Esto evidencia que el número de granos por silicua se mantiene estable frente a variaciones en el número de silicuas m^{-2} , por lo que para lograr altos rendimientos se debe buscar aumentos en este último componente mencionado.

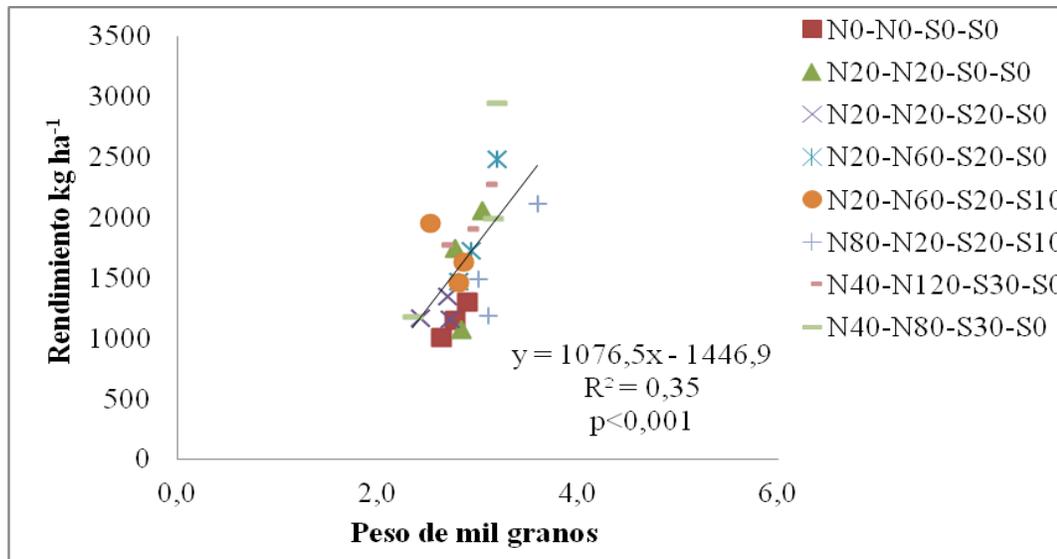


Figura 12. Relación entre rendimiento $kg\ ha^{-1}$ y peso de grano.

No se encontró una relación clara entre rendimiento y peso de grano, indicando una menor influencia de este componente en la concreción de rendimiento ($R^2 = 0,35$). Por lo tanto aumentos en el peso de grano no necesariamente se traduzcan en aumentos en el rendimiento (Figura 12). El peso de granos (PG) el cual se mantuvo estable dentro de ciertos rangos sin incidir sobre la variable de respuesta de forma significativa, nótese que se logran rendimientos muy distintos con un peso de grano muy similar. En general el peso de granos no muestra cambios significativos por agregados de N (Ogunlela et al., Hocking y Mason, citados por Agosti, 2011).

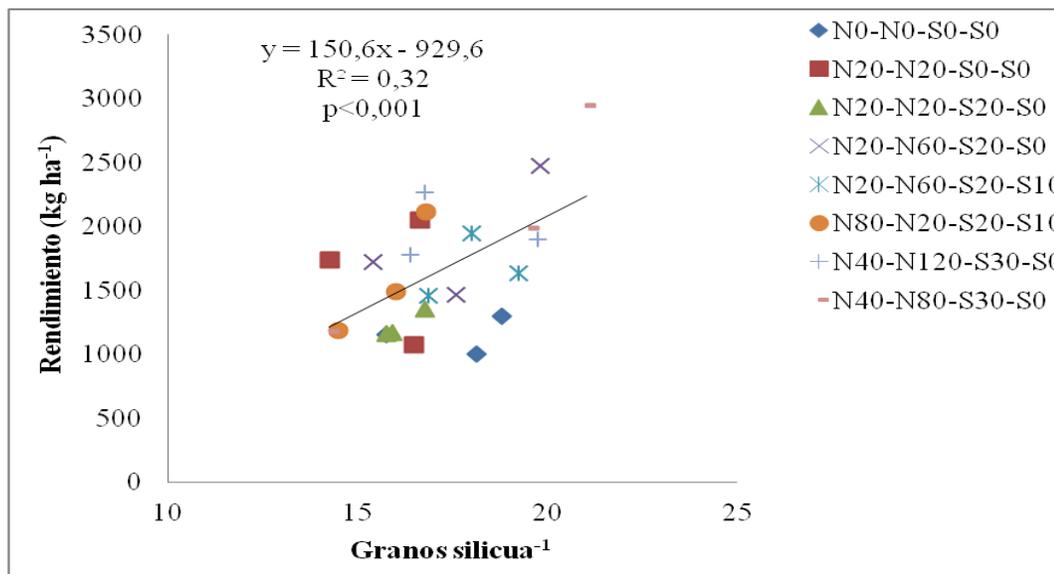


Figura 13. Relación entre el rendimiento y grano silicua⁻¹.

El número de granos silicua⁻¹ se mantuvo estable para un amplio rango de rendimientos logrados, por lo que puede afirmarse que esta variable no afectó significativamente el rendimiento, coincidiendo con Agosti (2011, Figura 13). Podría decirse que los componentes PG y granos silicua⁻¹ permanecen más estables frente a cambios del ambiente, en este caso, distintas ofertas de nutrientes.

A modo de síntesis se concluye que los componentes numéricos del rendimiento pueden agruparse según su importancia o influencia sobre el rendimiento alcanzado en primarios o secundarios; los primarios (número de grano y número de silicua) son aquellos que al aumentar producen un aumento en el rendimiento, en cambio los secundarios son aquellos que si bien pueden compensar una disminución del rendimiento no lo afectan de forma importante.

4.4. EFECTO GLOBAL DE LOS NUTRIENTES

En esta sección se analizarán los efectos entre la cantidad de nutriente aplicado y el absorbido sobre el rendimiento y el porcentaje de recuperación del fertilizante. Además, se calcularán la eficiencia de absorción, agronómica y fisiológica para los dos nutrientes estudiados.

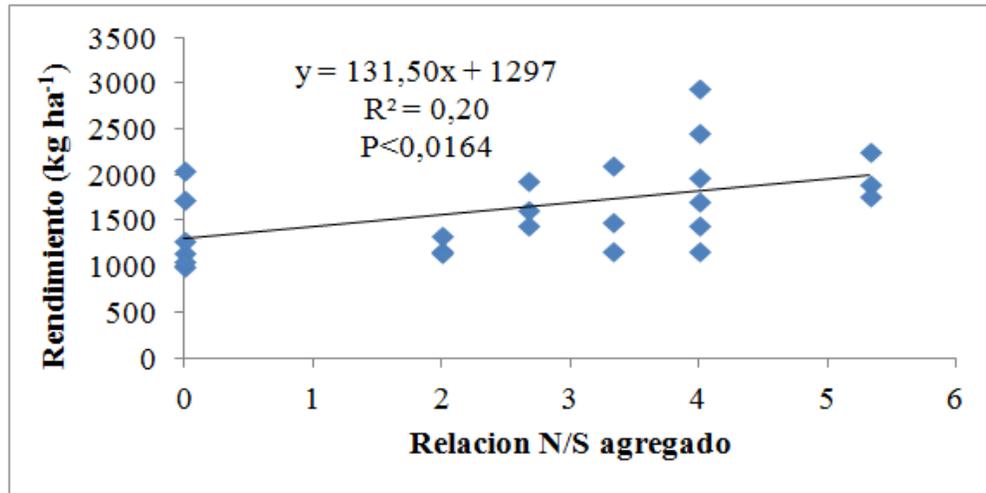


Figura 14. Rendimiento en grano en función de la relación N/S agregado.

La relación nitrógeno/azufre agregado estuvo poco asociada al rendimiento, contrario a lo mencionado por Cásala, citado por Burzaco et al. (2009) quien encontró una alta relación entre el rendimiento y el cociente N/S aplicado, cuya relación promedio fue de 6:1. En el presente ensayo la relación bajo la cual se encontraron los rendimientos más elevados fue de 4:1, aunque con una gran variación de resultados (Figura 14).

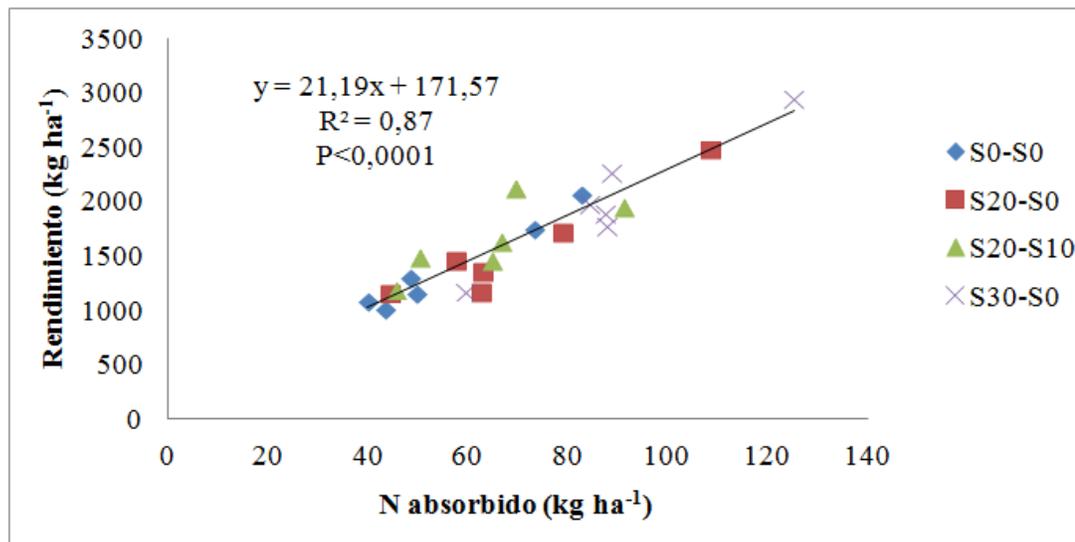


Figura 15. Relación entre el nitrógeno absorbido a cosecha y el rendimiento.

Se puede observar la estrecha relación que existe entre la cantidad de nitrógeno absorbido por el cultivo y el rendimiento alcanzado. El coeficiente de determinación de

0,87 indica un alto ajuste, por lo que la probabilidad de obtener un elevado rendimiento aumenta a medida que aumenta la cantidad de nitrógeno absorbido (Figura 15). Agosti (2011) observó la misma tendencia y el R^2 fue también de 0,87.

Es importante mencionar que la absorción promedio a cosecha del tratamiento N0-N0-S0-S0 fue de 47 kg ha^{-1} con una tasa de absorción promedio durante todo el ciclo del cultivo de $0,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (en anexos se presentan los datos de tasas de absorción por tratamientos). Esta baja tasa de absorción da una idea de que el aporte de N por parte del suelo fue también bajo, lo cual posiblemente sea consecuencia de que el mismo presenta una larga historia agrícola.

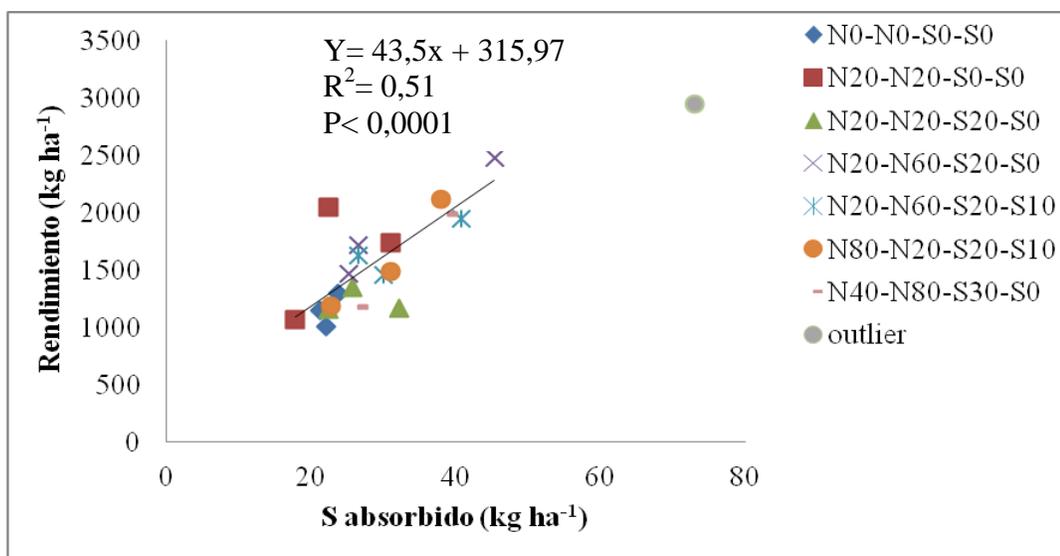


Figura 16. Rendimiento en grano en función del S absorbido a cosecha.

Para el caso del S, si bien la dispersión fue mayor que para el caso de nitrógeno siendo el coeficiente de determinación menor (0,87 vs. 0,51) la tendencia fue la misma; cuanto más azufre sea absorbido mayor será el rendimiento que alcance el cultivo, confirmando la importancia de conocer un modelo que represente la respuesta a este nutriente (Figura 16).

Con el objetivo de determinar cómo influyó la nutrición nitrogenada y azufrada en el rendimiento se presenta un árbol de clasificación y regresión del rendimiento en base a la cantidad de nutriente absorbido.

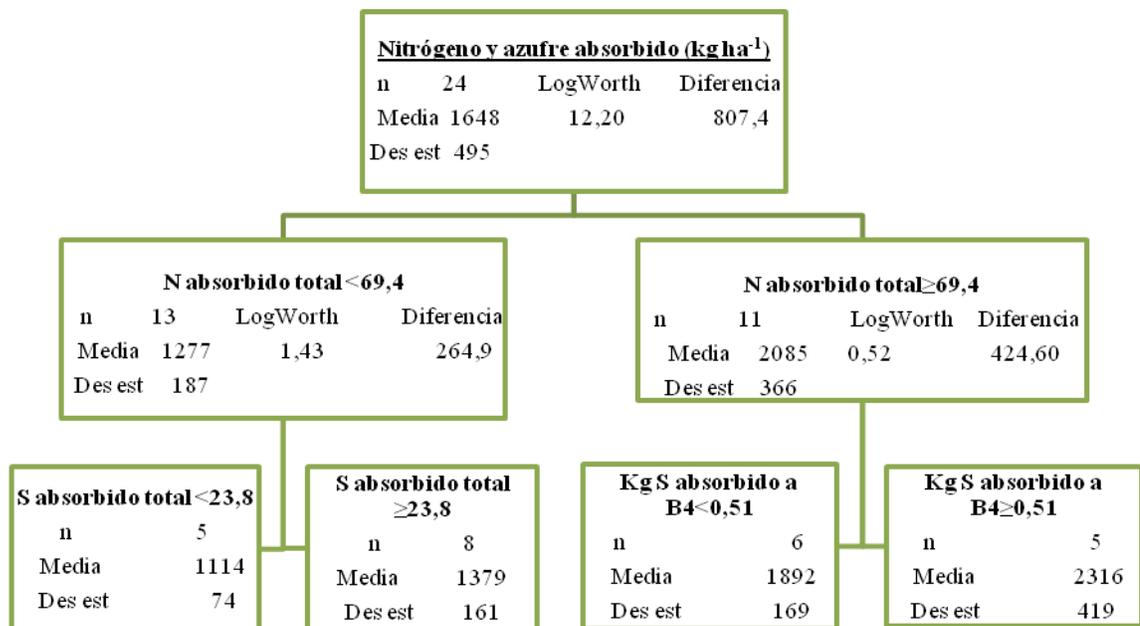


Figura 17. Árbol de clasificación y regresión para N y S absorbido.

El rendimiento en grano pudo partirse en primer orden en dos grupos en base al nitrógeno absorbido durante el ciclo del cultivo. Cuando el nitrógeno absorbido por el cultivo fue superior a 69 kg ha⁻¹ el rendimiento medio fue un 62% superior (2084 kg ha⁻¹ vs 1277 kg ha⁻¹).

Las 11 parcelas que lograron absorber más de 69 kg ha⁻¹ no se pudieron diferenciar estadísticamente entre sí (el LogWorth tomó un valor de 0,52), sin embargo se observa la tendencia que a mayor cantidad de azufre absorbido hasta el estadio B4 mayor es el rendimiento. El rendimiento fue un 22% superior cuando se logró absorber más de 0,51 kg ha⁻¹ hecho que pone en evidencia la importancia de la absorción temprana de este nutriente.

Las 13 parcelas que no superaron los 69 kg ha⁻¹ de N absorbidos se diferenciaron según el azufre absorbidos durante el ciclo. Cuando el valor fue mayor a 23,8 kg ha⁻¹ rinden en promedio 1379 kg ha⁻¹. La peor combinación fue cuando el nitrógeno y azufre absorbido fue menor a 69 y 23,8 kg ha⁻¹ respectivamente, logrando un rendimiento medio de tan sólo 1114 kg ha⁻¹.

4.5. EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE LOS NUTRIENTES

La fertilización juega un rol central en el manejo de los cultivos, y obtener altas eficiencias es indispensable para disminuir costos y además no provocar daños al medio ambiente, por lo que en el presente capítulo se analizará el efecto de diferentes disponibilidades de N y S sobre la eficiencia de uso de los nutrientes.

A continuación se presenta la relación entre el N y S agregado y absorbido, la eficiencia agronómica, fisiológica y de absorción, la eficiencia de utilización del fertilizante y el porcentaje de recuperación para dichos nutrientes.

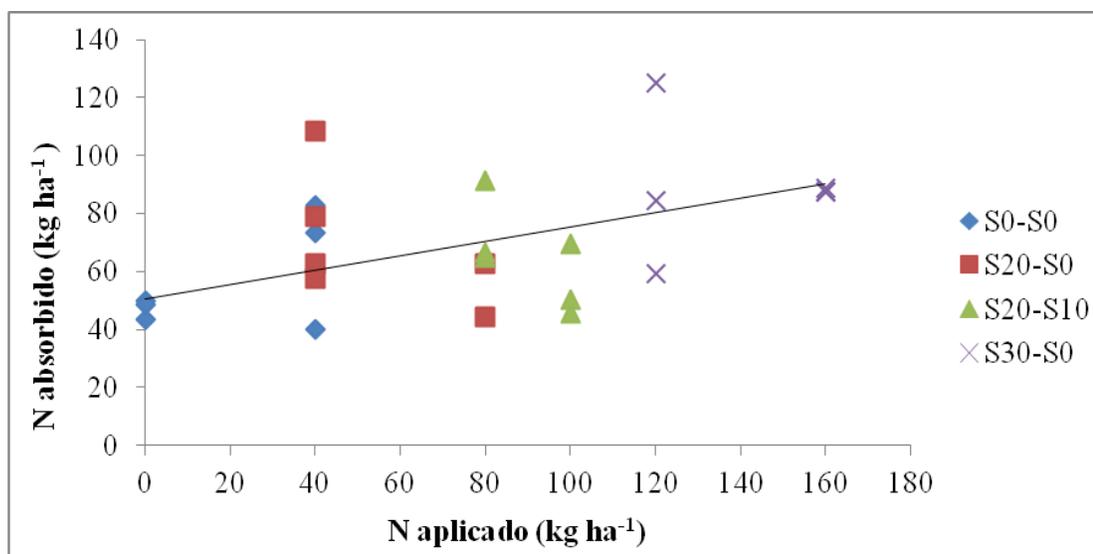


Figura 18. Relación entre el N agregado y el N absorbido a cosecha.

Cuanto mayor sea dosis de fertilizante mayor es la probabilidad de absorber cantidades altas de nitrógeno por parte del cultivo (Figura 18). En promedio N0 absorbió 47 kg N ha⁻¹, N40 61 kg N ha⁻¹, N80 78 kg N ha⁻¹, N100 55 kg N ha⁻¹, N120 unos 105 kg N ha⁻¹ y la absorción para N160 fue de unos 88 kg N ha⁻¹ (el número a continuación de la letra N representa la dosis total de N aplicada expresada en kg ha⁻¹), este último tratamiento a pesar de aplicar la dosis más elevada no presentó la mayor absorción, una de las causas es que dosis tan altas puedan causar un exceso de N el cual no puede ser absorbido. A pesar de que en términos generales se observó una respuesta positiva al agregado de N, es evidente la gran variabilidad que presentó el cultivo en la absorción de N pese a haber recibido la misma dosis de fertilizante. Para la absorción de N el coeficiente de variación promedio es de un 20% variando de un mínimo de 0.42% para los tratamientos N40-N120-S30-S0 y un máximo de 37 % para el N40-N80-S30-S0 (datos no presentados).

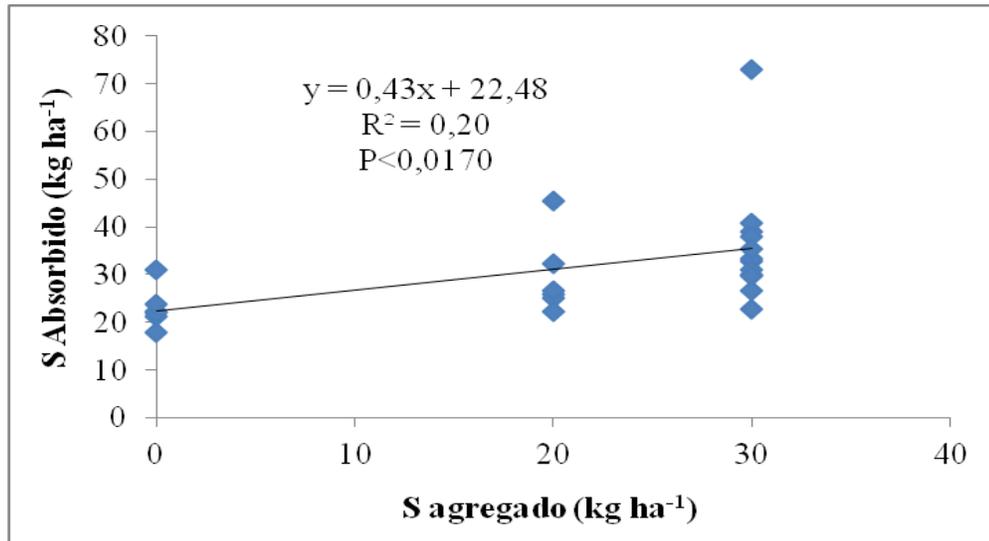


Figura 19. Relación entre el S aplicado y S absorbido.

Para el caso de azufre (Figura 19) se muestra una relación positiva entre el S agregado y el S absorbido lo que demuestra que a mayor aporte mayor absorción de S. Los valores variaron entre las distintas estrategias, la media para S0 es 23 kg S ha⁻¹, para S20 es de 30 kg S ha⁻¹ y para S30 es 36 kg S ha⁻¹ (S0, S20, S30 representan la dosis total de S kg ha⁻¹), el aporte del suelo pudo limitar la respuesta a la fertilización S, la variabilidad para una misma dosis de fertilizante aumento a medida que aumenta la dosis aplicada ya que para S = 0 el CV =19 %, S =20 el CV = 28% y para S = 30 el CV =35%, la gran variabilidad que presenta el gráfico se ve reflejada en el coeficiente de determinación el cual apenas es de 0,20.

Se puede apreciar claramente la relación entre la absorción de N y S indicando que la interacción entre ambos es positiva lo que demuestra que ante una alta dosis de nitrógeno el cultivo necesitara una mayor disponibilidad de azufre para así alcanzar un buen estatus nutricional que le permita concretar el rendimiento (Figura 20). La relación entre N absorbido y S absorbido por la planta es de dos a uno ($y = 2,01x + 8,22$), dicha relación afecta la respuesta al N ya que para una misma dosis de N en C1 el rendimiento alcanzado es mayor cuando el azufre no fue limitante. El azufre es el primer nutriente en limitar el rendimiento, ya que los rendimientos máximos logrados con S limitante son menores a los máximos sin S limitante. Cuando el azufre es limitante no sólo afecta la respuesta al agregado de nitrógeno sino también el crecimiento, obteniendo parcelas de menor rendimiento, por otro lado, cuando el azufre no fue limitante hubo una respuesta en el rendimiento a aumentos en el aporte de nitrógeno, a medida que aumenta la dosis nitrogenada aumenta el rendimiento alcanzado.

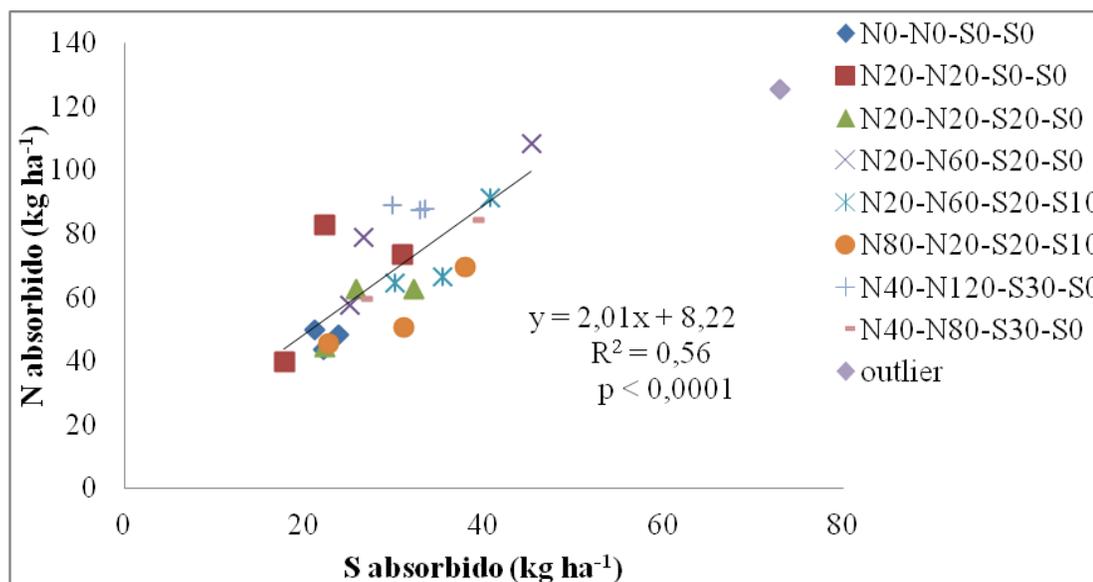


Figura 20. Relación entre el N y S absorbido.

Como se sabe el cultivo de colza presenta una gran respuesta al agregado de N y S por lo que mayores disponibilidades de estos nutrientes tendrán como consecuencia un mayor rendimiento en grano, pero esto no es loguable si no existe una armonía entre dichos nutrientes. En los gráficos presentados anteriormente puede verse que para que el cultivo pueda absorber cantidades importantes de N es necesario que exista una disponibilidad de S que no sea limitante.

Si bien el rendimiento responde positivamente al agregado de N y S, cuanto mayor sea la dosis, mayores son las pérdidas de fertilizante teniendo como consecuencia una menor eficiencia de uso. Por lo que conocer como varían las eficiencias respecto a distintas ofertas de nutrientes sería importante para mejorar el manejo de la fertilización. El análisis de las eficiencias permite a los investigadores entender mejor cómo se comportan los nutrientes y cuáles son las mejores estrategias de fertilización, que equilibren buenos rendimientos con eficiencias logrables aceptables, debido a que la mayor sincronización entre la demanda y la oferta de nutrientes por parte del cultivo se verá reflejada en una mayor eficiencia de uso. En este caso nos centraremos en la eficiencia agronómica de uso del N y S (EAUN- EAUS, eficiencia fisiológica del uso del N y S (EFUN-EFUS), eficiencia de absorción del N y S (EAN-EAS) y la eficiencia de uso del fertilizante.

Cuadro 8. Eficiencias agronómicas de uso para N y S.

EAUN			EAUS		
Tratamiento	Media		Tratamiento	Media	
N0-N0-S0-S0	49,58	A	N20-N20-S0-S0	98,63	A
N20-N20-S0-S0	25,34	B	N0-N0-S0-S0	77,51	AB
N20-N20-S20-S0	19,46	BC	N20-N60-S20-S0	48,89	BC
N20-N60-S20-S0	18,18	BCD	N40-N80-S30-S0	44,62	BC
N20-N60-S20-S10	16,31	CD	N40-N120-S30-S0	41,96	BC
N40-N80-S30-S0	14,28	CD	N20-N60-S20-S10	36,44	C
N80-N20-S20-S10	13,01	CD	N80-N20-S20-S10	35,37	C
N40-N120-S30-S0	10,8	D	N20-N20-S20-S0	33,94	C

Letras distintas indican diferencias significativas (p-valor < 0,05)

Analizando los datos de EAUN para los tratamientos que recibieron fertilizante podemos observar que el N20-N20-S0-S0 fue el que obtuvo mayor eficiencia ya que por kg de disponible de N (suelo + fertilizante) se obtuvo 25 kg ha⁻¹ de grano. En cambio, el N40-N120-S30-S0 fue el menos eficiente ya que genero 11 kg ha⁻¹ de grano por kg de N disponible, dicho tratamiento fue el fertilizado con una mayor dosis por lo que es esperable que este sea el de menor eficiencia, coincidiendo con lo mencionado por Hocking et al. (1997) quienes mencionan una reducción de la EAUN al aumentar la disponibilidad de N, siguiendo la ley de crecimientos decrecientes.

A diferencia de lo reportado por Salvagiotti et al. (2009) el agregado de S no mejoró la EAUN; esto puede verse en los tratamientos que presentaron la misma fertilización nitrogenada pero variaron en cuanto a la azufrada. Los tratamientos N20-N20-S0-S0 y N20-N20-S20-S0 presentaron una eficiencia muy similar sin poder diferenciarlas estadísticamente, incluso en valores absolutos puede observarse una caída de la eficiencia por el agregado de S. Lo mismo ocurrió para los tratamientos N20-N60-S20-S0 y N20-N60-S20-S10. Una posible causa de que el agregado de S no mejorara la EAUN podría ser debido a una elevada oferta de este elemento por parte del suelo. El contenido de S disponible en los tratamientos sin agregado de S vía fertilizante fue de 31,5; 8,5 y 16,2 kg S ha⁻¹ para los bloques I, II y III, respectivamente.

En cuanto a la EAUS si consideramos los tratamientos que recibieron fertilizante azufrado no presentaron diferencias significativas entre ellos, la máxima EAUS fue de 49 kg ha⁻¹ de grano por kg de S disponible para el tratamiento N20-N60-S20-S0, el mínimo fue de 34 kg ha⁻¹ de grano por kg de S disponible para N20-N20-S20-S0, el promedio de EAUS fue de 40 kg ha⁻¹ de grano por kg de S disponible para los tratamientos con S aplicado.

Vale la pena mencionar que altos valores de EAUN no se correspondieron con altos rendimientos, por el contrario a medida que el rendimiento aumentó las eficiencias disminuyeron. En cuanto a EAUS no pudo observarse ninguna tendencia clara (datos presentados en anexos).

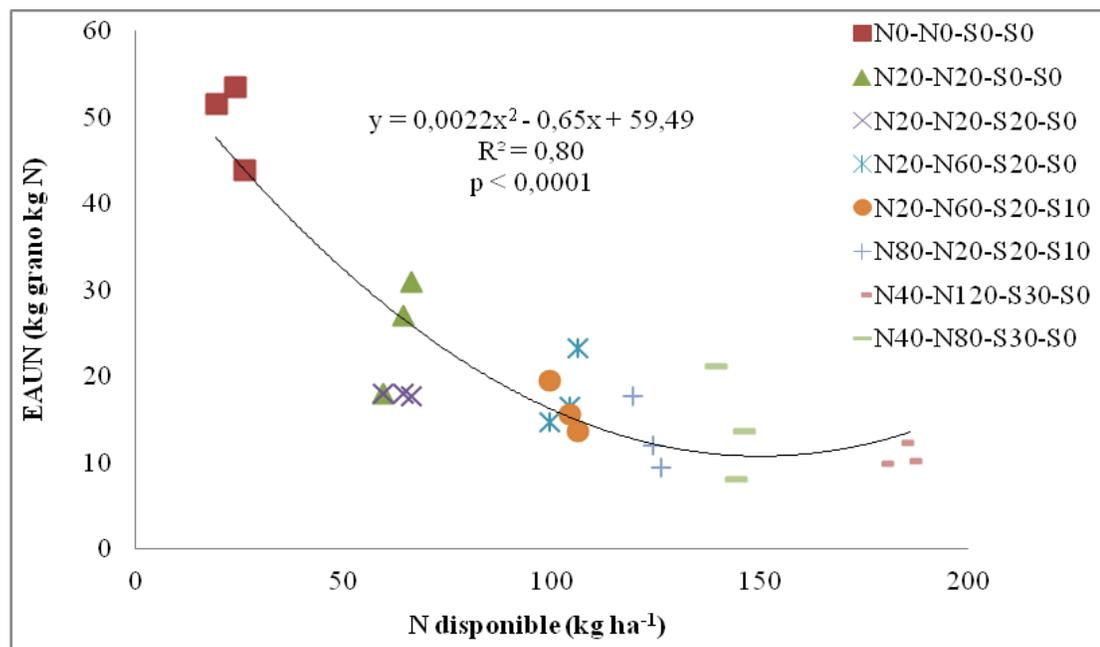


Figura 21. Eficiencia en el uso del N en función del N disponible (suelo+fertilizante).

Para el rango de N disponible (suelo + fertilizante) de la presente tesis, el cual tuvo un mínimo de 26 kg y un máximo de 186 kg ha⁻¹ se obtuvo una EAUN promedio para el ensayo de 20,9 kg de grano por kg de N disponible, siendo este valor superior al 8,3 kg reportado por Agosti (2011) para el rango de 47 a 279 kg N ha⁻¹. Puede observarse la relación negativa existente entre la EAUN y el nivel de N disponible, ya que la eficiencia cae frente a aumentos de la disponibilidad de N hasta un nivel crítico de N de 150 kg N ha⁻¹.

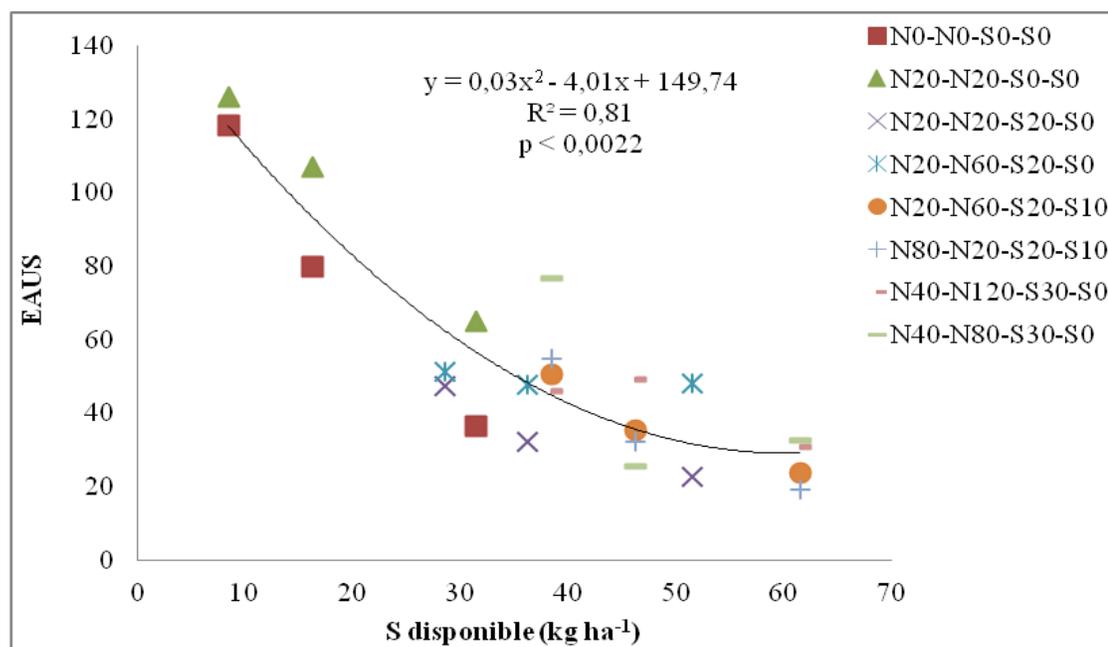


Figura 22. Eficiencia en el uso del S en función del S disponible.

Para el rango de S disponible (suelo + fertilizante) del trabajo en el presente ensayo, el cual varió entre un mínimo de 8,5 kg ha⁻¹ y un máximo de 61,5 kg ha⁻¹ se obtuvo una EAUS de 52,4 kg de grano por kg de S disponible. Para el rango de S disponible mencionado anteriormente no fue posible encontrar un nivel crítico de S a partir del cual la eficiencia no caiga.

Las disponibilidades más elevadas de N y S (tratamientos que aplicaron las mayores dosis) obtuvieron en general bajas eficiencias agronómicas de uso, sin embargo muy posiblemente superen a la relación de precios (kg grano kg de N y S ha⁻¹) mínima para cubrir los costos de fertilización, es decir, aun con las mayores dosis aplicadas en el presente ensayo se estaría percibiendo un rédito por realizar dicha práctica.

Cuadro 9. Eficiencia fisiológica de uso de N y S.

EFUN			EFUS		
Tratamiento	Media		Tratamiento	Media	
N80-N20-S20-S10	28,66	A	N20-N20-S0-S0	69,44	A
N20-N20-S0-S0	25,14	AB	N40-N120-S30-S0	62,35	AB
N0-N0-S0-S0	24,38	B	N20-N60-S20-S0	59,24	ABC
N20-N60-S20-S0	23,42	B	N80-N20-S20-S10	51,91	BC
N20-N60-S20-S10	22,79	B	N0-N0-S0-S0	51,43	BC
N40-N120-S30-S0	22,52	B	N20-N60-S20-S10	47,49	BC
N40-N80-S30-S0	22,29	B	N20-N20-S20-S0	46,89	BC
N20-N20-S20-S0	22,19	B	N40-N80-S30-S0	45,27	C

Letras distintas indican diferencias significativas (p-valor < 0,05).

Tal como era de esperar la eficiencia fisiológica (EFUN) presento poca variación para las distintas dosis utilizadas, ya que dicha eficiencia depende más de la propia especie que de la disponibilidad de nutrientes. Agosti (2011) reportó una EFUN de 22,8 kg de grano por kg de N absorbido, siendo este valor muy similar al del presente experimento (23,9 kg de grano por kg de N absorbido). Sin embargo EFUS presento una mayor variación que va desde un máximo de 69,4 kg de grano por kg de S absorbido por N20-N20-S0-S0 a un mínimo de 45,3 kg de grano kg de S absorbido por N40-N80-S30-S0.

Respecto a la EFUN el tratamiento N80-N20-S20-S10 se diferenció significativamente de los demás (excepto del N20-N20-S0-S0), y al analizar esta superioridad los datos muestran que las relaciones N/S en grano y biomasa a cosecha, la relación N absorbido y S absorbido son las más bajas, seguramente esta condición determino una mayor eficiencia ya que por unidad de N utilizada este tratamiento contaba con mas S que los demás. Otros datos interesantes de este tratamiento es que logró el mayor IC (32%) y el mayor % de MG en grano (49%), siendo esta variable muy afectada por el S.

Cuadro 10. Eficiencia de absorción de N y S.

EAN			EAS		
Tratamiento	Media		Tratamiento	Media	
N0-N0-S0-S0	2,04	A	N0-N0-S0-S0	1,56	A
N20-N20-S0-S0	1,02	B	N20-N20-S0-S0	1,56	A
N20-N20-S20-S0	0,89	BC	N40-N80-S30-S0	1,03	A
N20-N60-S20-S0	0,78	BCD	N20-N60-S20-S0	0,83	A
N20-N60-S20-S10	0,72	BCD	N20-N60-S20-S10	0,77	A
N40-N80-S30-S0	0,63	CD	N20-N20-S20-S0	0,71	A
N40-N120-S30-S0	0,48	D	N40-N120-S30-S0	0,68	A
N80-N20-S20-S10	0,45	D	N80-N20-S20-S10	0,67	A

Letras distintas indican diferencias significativas (p-valor < 0,05).

La EAN y EAS se obtiene a partir de la relación entre el N y S absorbido y el disponible. En el caso de la EAN el tratamiento que fue superior al resto diferenciándose estadísticamente fue N0-N0-S0-S0. También pudo observarse la tendencia a que a medida que aumenta la dosis de N aplicada la eficiencia de absorción disminuye. Para el presente ensayo se obtuvo una EAN promedio de 0,87 kg de N absorbido por kg de N disponible, superior a los valores reportados por Salvagiotti et al. (2009) quienes obtuvieron valores de entre 0,42 y 0,70 kg N absorbido kg N disponible, para situaciones de baja y alta oferta de azufre. Agosti (2011), trabajando con un rango de disponibilidad de N mayor al del presente trabajo reporto una EAN de 0,45 kg de N absorbido por kg de N disponible.

En cuanto a la EAS, no existen diferencias significativas entre tratamientos. El máximo fue de 1,56 kg de S absorbido por kg de S disponible para N0-N0-S0-S0, y un mínimo de 0,67 kg de S absorbidos por kg de S disponible para N80-N20-S20-S10. El hecho de que el tratamiento N0-N0-S0-S0 haya absorbido mas S del que había disponible puede deberse a que no se considero aporte del suelo por mineralización de materia orgánica.

A continuación se presenta la eficiencia de uso del fertilizante, a partir de la cual es posible conocer el aumento del rendimiento por cada UN (unidades de N) agregado respecto al testigo sin fertilizar. Dicha eficiencia permite realizar un cálculo económico para decidir la conveniencia o no de fertilizar.

Cuadro 11. Eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado.

Tratamiento	Eficiencia de uso de N	
N20-N20-S0-S0	11,73	A
N20-N60-S20-S0	9,21	A
N40-N80-S30-S0	7,38	A
N20-N60-S20-S10	6,59	A
N40-N120-S30-S0	5,19	A
N80-N20-S20-S10	4,44	A
N20-N20-S20-S0	1,88	A

Letras distintas indican diferencias significativas (p-valor < 0,05).

No fue posible encontrar diferencias significativas estadísticamente entre los tratamientos evaluados en el presente ensayo. La eficiencia promedio para los tratamientos que recibieron un aporte de nitrógeno fue de 6,6 kg de grano por cada unidad de nitrógeno aplicada. En trigo, Salvagiotti et al. (2009) obtuvieron valores de eficiencia de N promedio de 8,4 y 10,6 kg de grano por kg UN sin agregado de azufre y con agregado de azufre, respectivamente. Vale la pena mencionar que estas eficiencias no son del todo comparables debido al alto costo energético de producción del grano de colza (contenido de aceite en grano oscila entre 40 y 50%) y al menor índice de cosecha, por lo tanto lo correcto sería corregirlas por el costo de producción de aceite.

Cuadro 12. Eficiencia de uso del fertilizante azufrado.

Tratamiento	Eficiencia de uso de S	
N20-N60-S20-S10	36,82	A
N40-N80-S30-S0	29,51	A
N40-N120-S30-S0	27,66	A
N20-N60-S20-S10	17,56	A
N80-N20-S20-S10	14,8	A
N20-N60-S20-S0	3,75	A

Letras distintas indican diferencias significativas (p-valor < 0,05).

Con un promedio de 21,7 kg de grano por US (unidades de S) aplicada, está claro que vale la pena fertilizar la colza con azufre ya que es un elemento que limita el rendimiento incluso una deficiencia severa puede provocar rendimiento cero. La máxima eficiencia fue de 36,8 kg de grano por US aplicada para el tratamiento N20-N60-S20-S10, y el mínimo fue de 3,75 kg de grano por US aplicada para el tratamiento N20-N60-S20-S0.

A continuación se presenta la figura con los porcentajes de recuperación de nitrógeno aplicado promedio por tratamiento.

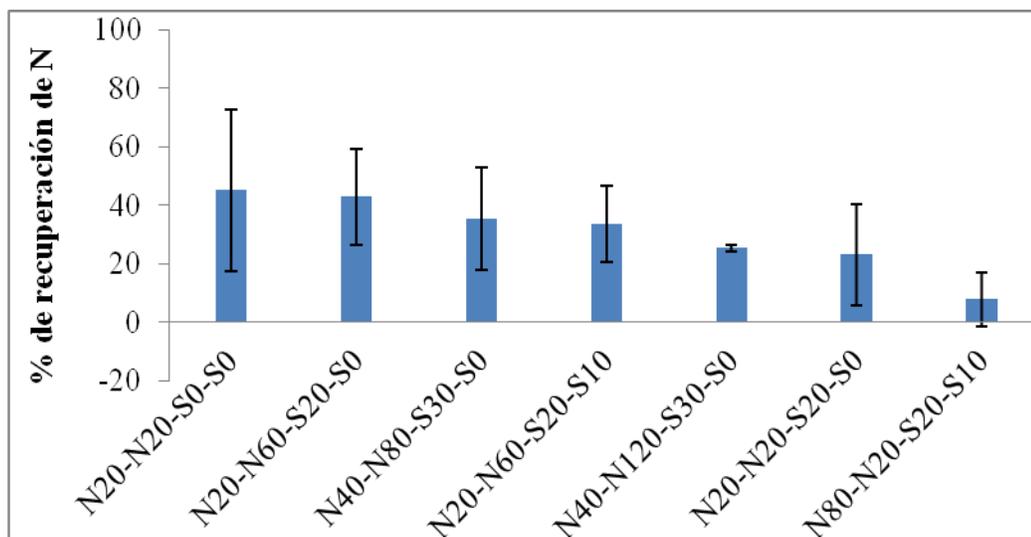


Figura 23. Porcentaje de recuperación de nitrógeno aplicado según tratamiento.

Si analizamos la recuperación aparente del nitrógeno en relación al total aplicado se observa claramente que el tratamiento N80-N20-S20-S10 es por relación el que menos utiliza el nutriente aplicado ya que recibe una dosis total de nitrógeno de $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$ pero sólo alcanza a recuperar un 10 % del disponible como fertilizante. La causa probable de dicha ineficiencia podría ser el momento de aplicación. Altas dosis de nitrógeno (80 kg ha^{-1}) en implantación momento en el cual no puede ser utilizado eficientemente debido a la escasa demanda por el cultivo. Queda claro que este fraccionamiento (80 y 20 kg de N ha^{-1} , para implantación y C1, respectivamente) es una manera ineficiente de aplicar el N, y para evitar eficiencias de recuperación bajas sería conveniente el fraccionamiento con menor cantidad a siembra tal como está sugerido en la bibliografía (Cordeiro et al., 1993). Un claro ejemplo de esto son los tratamientos N20-N60-S20-S0, N40-N80-S30-S0, N20-N60-S20-S10 Y N40-N120-S30-S0 cuya proporción de N recuperado son 42%, 38%, 37% y 28 % respectivamente.

A continuación se presentan la figura con los porcentajes de recuperación de azufre aplicado promedio por tratamiento.

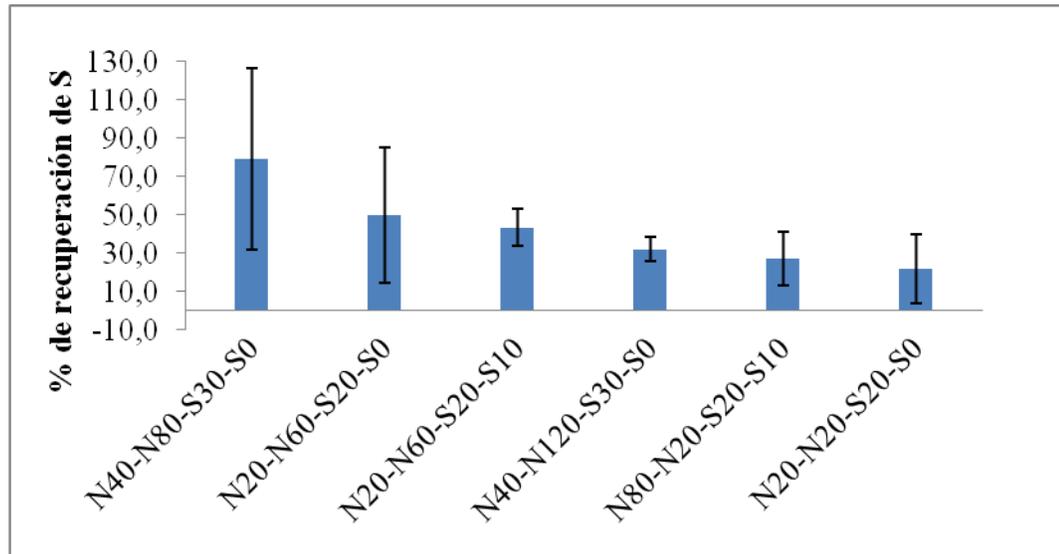


Figura 24. Porcentaje de recuperación de S aplicado según tratamiento.

Como se aprecia el tratamiento N40-N80-S30-S0 fue el que obtuvo mayor valor de recuperación del fertilizante (80% del aplicado), aunque no se diferenció estadísticamente de los demás tratamientos que se fertilizaron con S, puede resaltarse que no es necesario el fraccionamiento del azufre para conseguir mayores eficiencias como si es el caso del N, por el contrario al fraccionar la aplicación de S se observó una caída de la eficiencia, la media de los tratamientos sin fraccionar es 45,8% y los que fraccionaron es 35,3%. Malhi (1999) afirma que se debe mantener un suministro constante de S desde emergencia hasta elongación de vara floral, demostrando la importancia de este nutriente en los primeros estadios del cultivo, por lo tanto la aplicación de este nutriente en el estadio de elongación estarían no estarían coordinadas con la demanda del cultivo.

4.6. NIVELES CRÍTICOS E ÍNDICES NUTRICIONALES PARA N Y S

En las figuras siguientes se presentaran las curvas de dilución del nitrógeno total crítico ($N_c = 5,21 MS^{-0,36}$) y S total crítico ($S_c = 1,22e^{-0,18}MS$) (Figuras 25 y 26) desarrolladas por Ferreira (2014), en los cuales se incluyó los valores obtenidos de % de N y % S en planta en el estadio C1 para el presente trabajo.

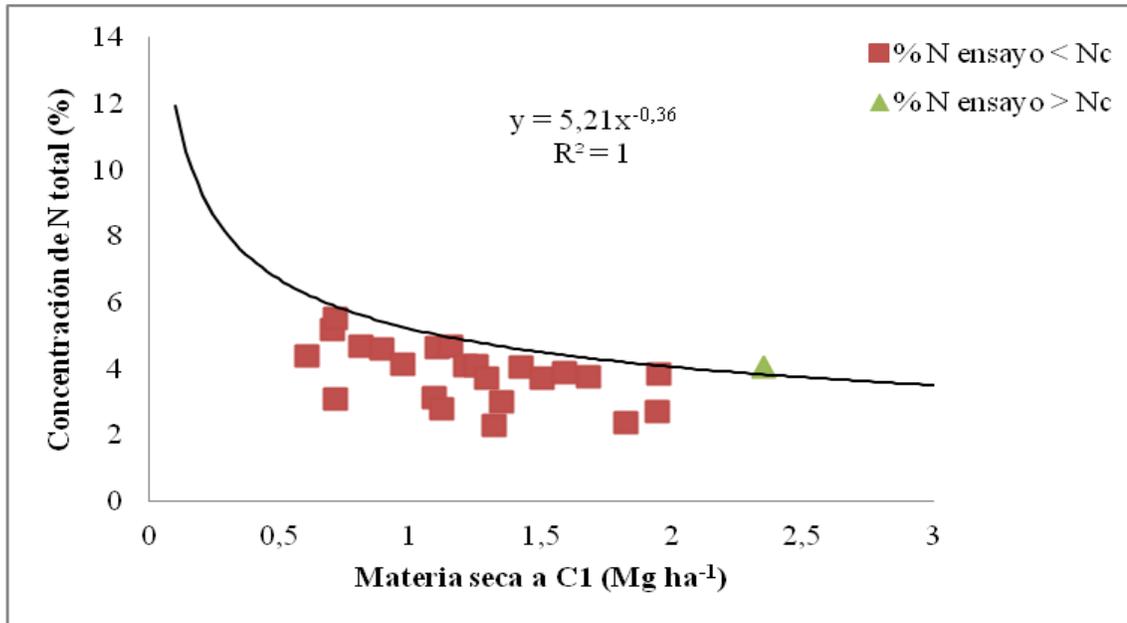


Figura 25. Concentración crítica de nitrógeno según Ferreira (2014) y concentración de nitrógeno total en planta (ensayo).

A pesar del rango de dosis utilizada, puede observarse que sólo una parcela tuvo un contenido de nitrógeno en planta superior al crítico, llamativamente esta parcela fue el tratamiento N0-N0-S0-S0 por lo que la misma no recibió ningún aporte de N, dicho valor es un caso aislado el cual no aporta datos concretos para la investigación. Se distingue claramente la gran variabilidad que presenta tanto la concentración de nitrógeno como la producción de materia seca, habiendo casos donde el nivel crítico está muy cerca del %N actual y en otras parcelas el % de nitrógeno está más alejado del Nc, lo cual indicaría la magnitud de la deficiencia. A medida que aumento la producción de materia seca se observa el efecto de dilución del nitrógeno. Debe mencionarse que no se pudo apreciar una tendencia clara a que un tratamiento en particular siempre estuviera por encima del Nc, dicho de otra forma, ningún tratamiento supero al Nc en todos los bloques.

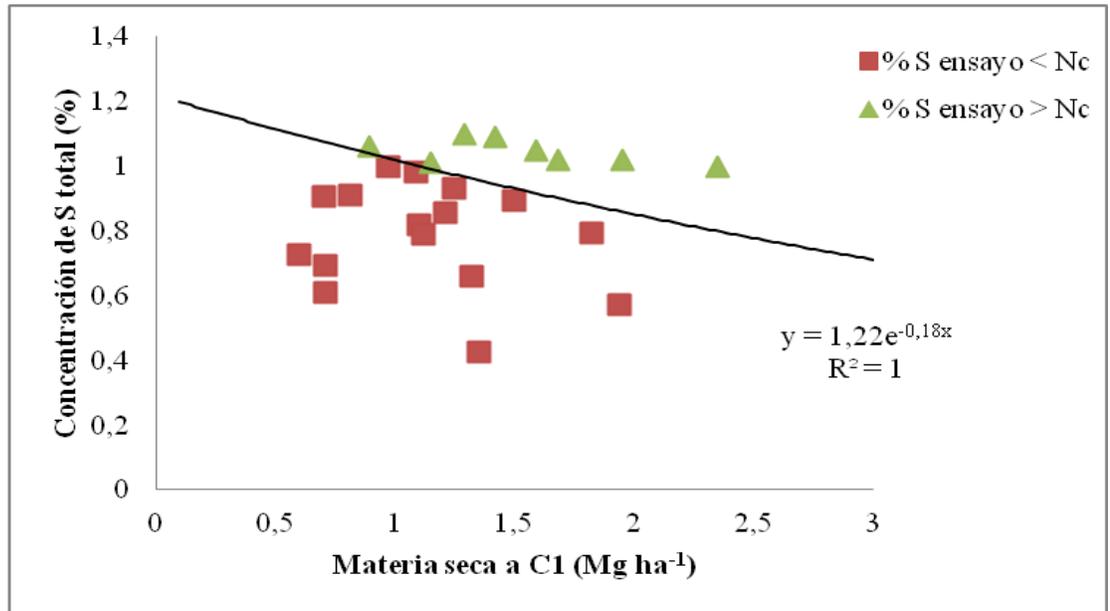


Figura 26. Concentración crítica de azufre según Ferreira (2014) y concentración de azufre total en planta (ensayo).

Para el caso del azufre, sólo un tercio de las parcelas tuvieron un valor superior al nivel crítico para azufre superando los requerimientos del cultivo para la producción de materia seca, mientras que 4 parcelas si bien no superaron el Nc se ubicaron muy cerca, por lo que el S posiblemente no haya sido limitante. El resto de los puntos que se ubicaron por debajo de la curva del modelo propuesto por Ferreira posiblemente presenten deficiencias en S para la producción de materia seca, repercutiendo en el rendimiento logrado.

El rango de variación en biomasa con el cual trabajo Ferreira (2014) estuvo entre 0,55 y 5,97 Mg ha⁻¹ de materia seca y entre 2,6 y 6,4% y 0,4 y 1,3%, para la concentración crítica de Nt y St respectivamente. En cuanto al presente trabajo el rango de variación en biomasa fue de 0,70 y 2,35 Mg ha⁻¹ de materia seca y entre 2,3 y 5,5% y 0,4 y 1,1%, para la concentración crítica de Nt y St respectivamente. El menor rango de los datos correspondientes al presente trabajo respecto al experimento realizado por Ferreira (2014) se explicarían debido a que los datos de este autor provienen de un conjunto de 8 experimentos, donde las condiciones de clima y suelo variaron entre experimentos aumentando la dispersión de los datos.

4.6.1. Índices nutricionales para N y S

Si bien para una misma cantidad de nitrógeno y azufre absorbido el cultivo puede estar en condiciones óptimas o sub-óptimas de nutrición dependiendo de la acumulación de biomasa del mismo, sería interesante conocer, a grandes rasgos la cantidad de nutriente que se necesita absorber para que el cultivo se desarrolle en condiciones de nutrición no limitante. Por lo dicho anteriormente es que se presentaron la relación entre los índices nutricionales y la cantidad nutrientes absorbidos.

La relación entre el N absorbido a inicio de elongación y el INN, estuvieron linealmente asociados y las mayores absorciones ocurrieron en los tratamientos con azufre no limitante se acuerdo al INS.

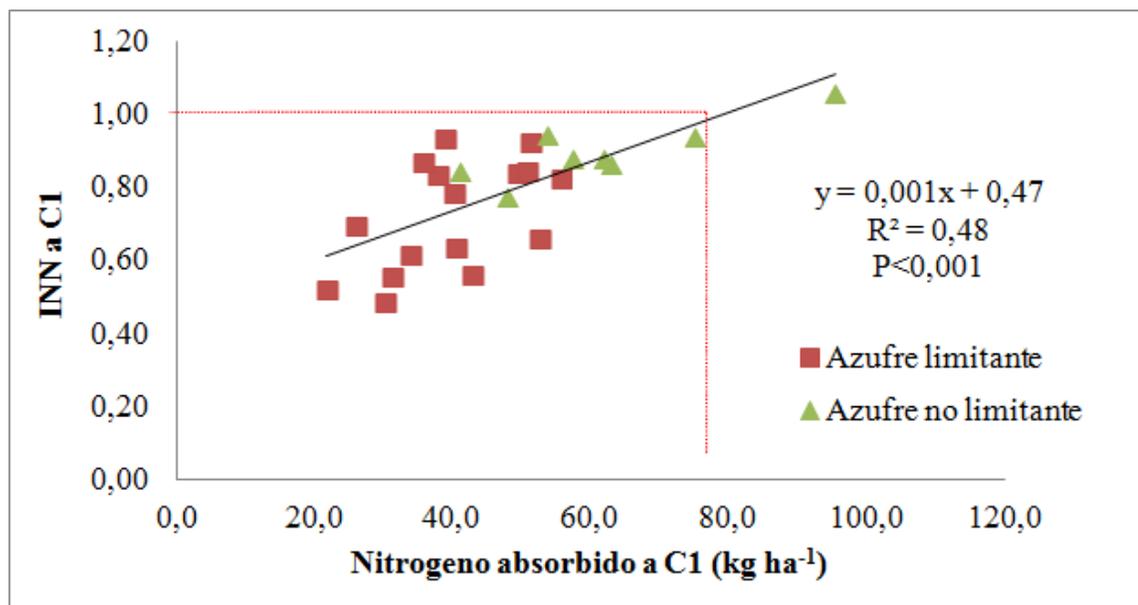


Figura 27. Índice de nutrición nitrogenada a elongación en función del nitrógeno absorbido previo a elongación tanto para azufre limitante como suficiente.

El índice nutricional nitrogenado está afectado por la condición de azufre, ya que los INN más bajos se obtienen cuando el azufre es limitante, esto nos da la idea de que el primer nutriente a corregir es el azufre. El gráfico indicaría que para este experimento el valor crítico de nitrógeno absorbido a C1 para lograr un INN de suficiencia (1.04) sería necesario absorber 80 kg N ha⁻¹, valor superior al reportado por Ferreira (2014) el cual para colzas primaverales determinó un nivel crítico de nitrógeno absorbido de 54 kg N ha⁻¹ para alcanzar INN no limitante.

Los tratamientos que lograron absorber mayor cantidad de N a C1 superaron los 40 kg ha^{-1} los cuales fueron N80-N20-S20-S10, N40-N120-S30-S0, N40-N80-S30-S0, N20-N20-S20-S0 cuyos valores fueron 47,8, 49,2, 52,9, 52,2 respectivamente. El resto de los tratamientos no lograron absorber más de 40 kg ha^{-1} N0-N0-S0-S0, N20-N20-S0-S0, N20-N60-S20-S0, N20-N60-S20-S10 absorbieron 37,7, 40,2, 40,6, 40,0 respectivamente.

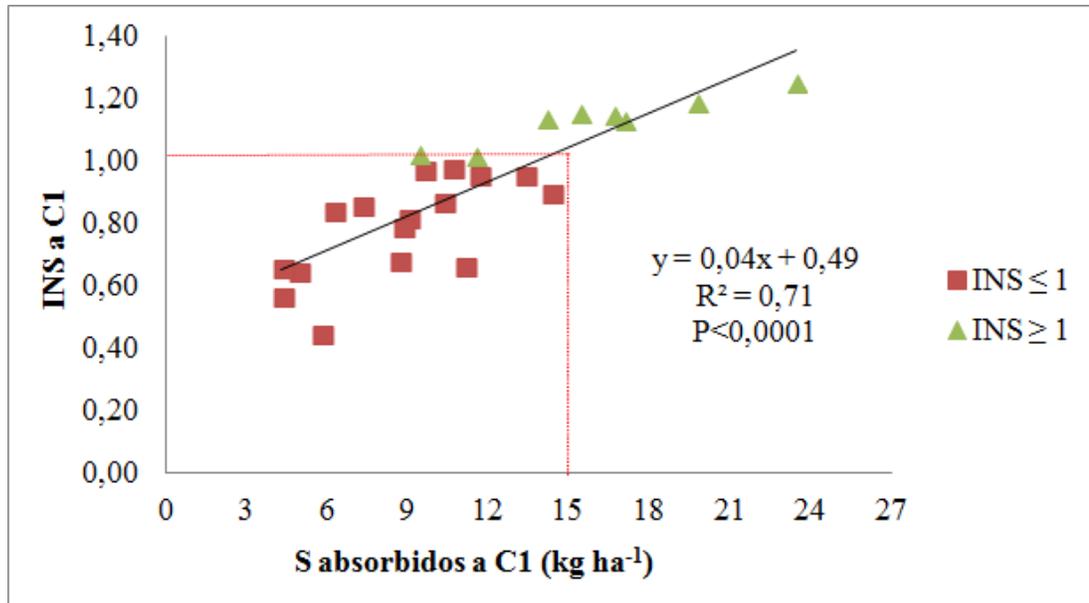


Figura 28. Índice nutrición azufrada en función del azufre absorbido previo al estadio de elongación.

Con una absorción de azufre en elongación mayor a 15 kg ha^{-1} se asegura un índice de nutrición azufrada superior al crítico, por lo cual estaríamos en una situación de azufre no limitante. Cuando la absorción es inferior a los 15 kg ha^{-1} igualmente podemos encontrarnos en una situación de suficiencia nutricional pero las posibilidades de que el rendimiento se encuentre limitado aumentan. La media de S absorbido para las parcelas con azufre suficiente fue de $15,2 \text{ kg S ha}^{-1}$, el mínimo fue de $9,4 \text{ kg S ha}^{-1}$, datos similares a los obtenidos por Ferreira (2014) cuya media fue de $17,5 \text{ kg S ha}^{-1}$ y un mínimo de $6,3 \text{ kg S ha}^{-1}$ para parcelas con azufre suficiente.

Los tratamientos que lograron absorber mayor cantidad de S a C1 fueron N80-N20-S20-S10, N40-N120-S30-S0, N20-N60-S20-S0, N20-N20-S20-S0, N40-N80-S30-S0 cuyos valores son 10,6, 12,5, 11,5, 12,6, 13,2 kg S ha^{-1} respectivamente. El resto de los tratamientos N0-N0-S0-S0, N20-N20-S0-S0, N20-N60-S20-S10 cuyos valores fueron 7,3, 8,9, 8,7 kg S ha^{-1} respectivamente. Puede observarse como tendencia general

que los tratamientos que lograron absorber mayor cantidad de S a C1 fueron los que recibieron un mayor aporte de este nutriente a siembra.

4.7. VALIDEZ DE LOS ÍNDICES NUTRICIONALES

Los índices nutricionales para N y S, que se calculan a partir de la concentración Nt y St en planta y la materia seca producida en C1 pueden ser útiles para diagnosticar el estado nutricional del cultivo, momento en el cual es adecuado a corrección de la deficiencia mediante la aplicación de fertilizante al suelo para lograr los más altos rendimientos en grano (Ferreira, 2014), sin embargo en el presente trabajo no se pudieron analizar con mayor profundidad los INN por falta de datos por encima del Nc (INN = 1.04) establecido.

Con el objetivo determinar la validez de los índices nutricionales, es que se presentan las siguientes graficas.

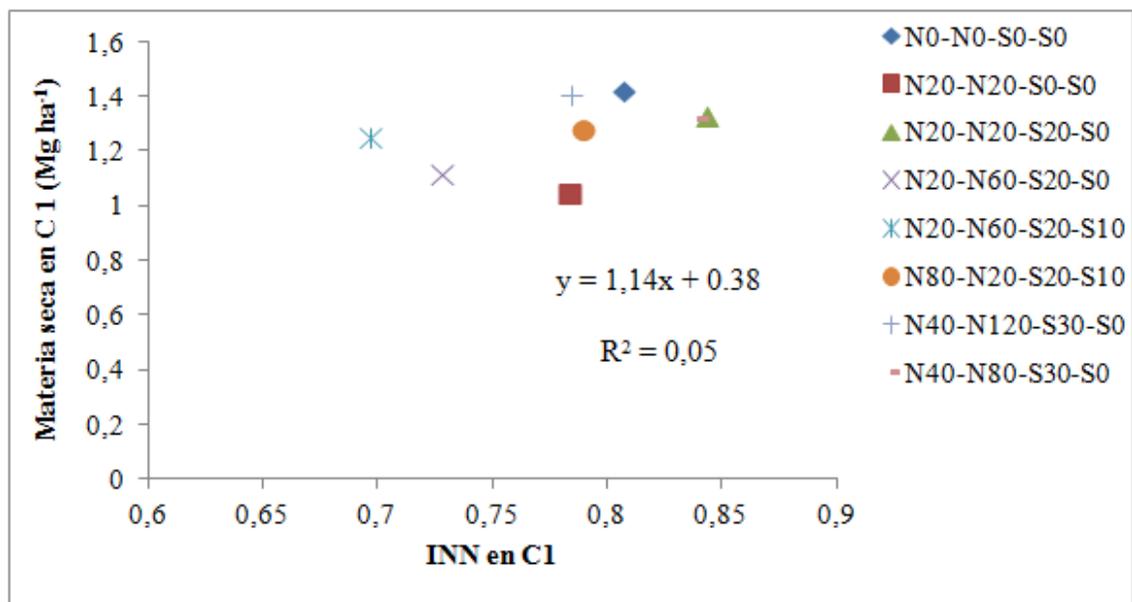


Figura 29. Relación entre INN y producción de materia seca en C1 por tratamiento.

Al tomar como referencia el INN crítico de 1.04 para la máxima producción de MS en C1 (Ferreira, 2014) se observa claramente (Figura 29) que ninguna de las parcelas supero dicho valor, determinado que se encuentren en posición de N limitante, dicho de otra manera la deficiencia de N está limitando la producción de MS, la cual si no se corrige reducirá el rendimiento final.

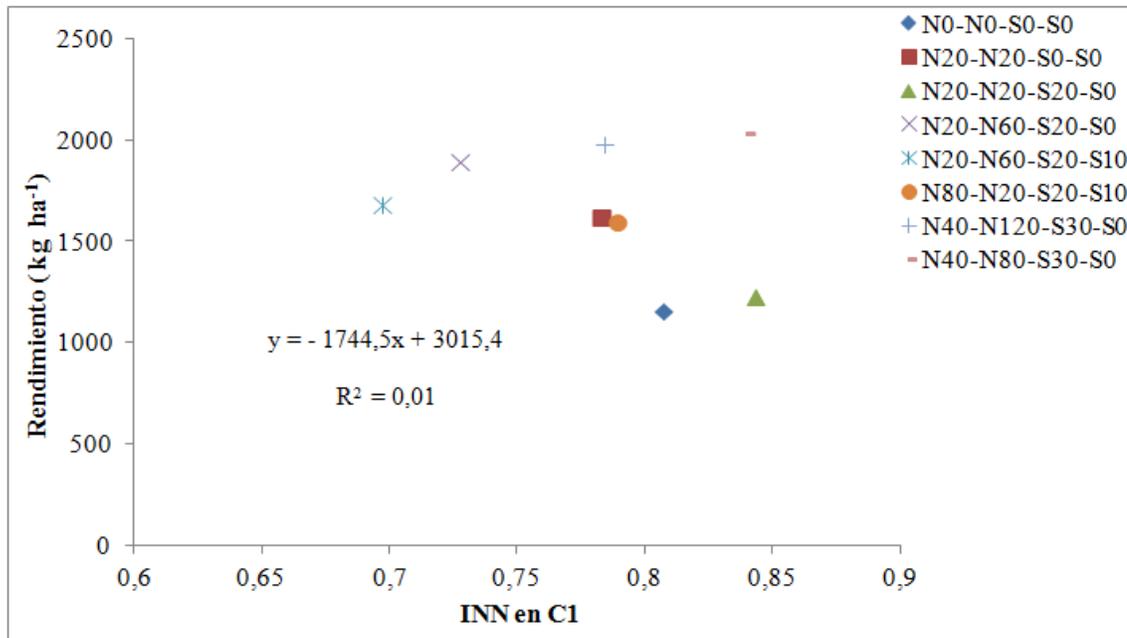


Figura 30. Relación entre el INN en C1 y el rendimiento final por tratamiento.

Todas las parcelas se encontraron en condición de N limitante condicionando así el rendimiento, con el objetivo de corregir la deficiencia de nitrógeno en C1 se aplicó fertilizante nitrogenado en diferentes dosis. A continuación se presentará el beneficio extra por fertilizar con nitrógeno en C1 cuando el cultivo presenta un INN limitante, el tratamiento N40-N80-S30-S0 obtuvo un beneficio de 885 kg ha⁻¹ de grano, N40-N120-S30-S0 un beneficio de 830 kg ha⁻¹ de grano, N20-N60-S30-S0 736 kg ha⁻¹ de grano, N20-N60-S20-S10 527 kg ha⁻¹ de grano, N20-N20-S0-S0 de 469 kg ha de grano, N80-N20-S20-S10 444 kg ha⁻¹ de grano y N20-N20-S20-S0 75 kg ha⁻¹ de grano más que el testigo sin fertilizar N0-N0-S0-S0, indicando que se puede corregir una deficiencia de nitrógeno con la aplicación de fertilizante, la dosis que mejor ajusto la deficiencia en C1 fue de 80 kg ha⁻¹.

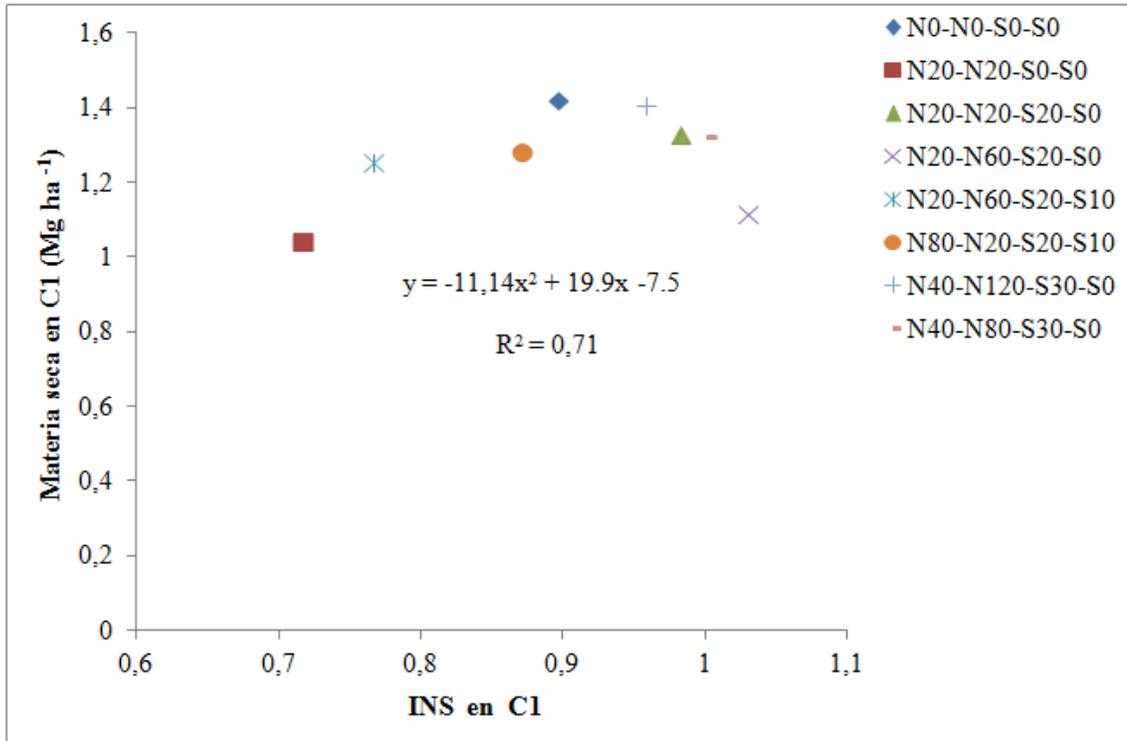


Figura 31. Relación entre la materia seca acumulada y el INS en C1 promedio por tratamiento.

Se puede observar en el gráfico aumentos de la materia seca producida en C1 hasta valores de INS 0,9, coincidiendo con Ferreira (2014) quien encontró un valor de INS crítico 0,88 para la máxima producción de MS en C1, cabe aclarar que luego de este momento se aplicaron distintas estrategias de fertilización que repercutirán en el rendimiento final.

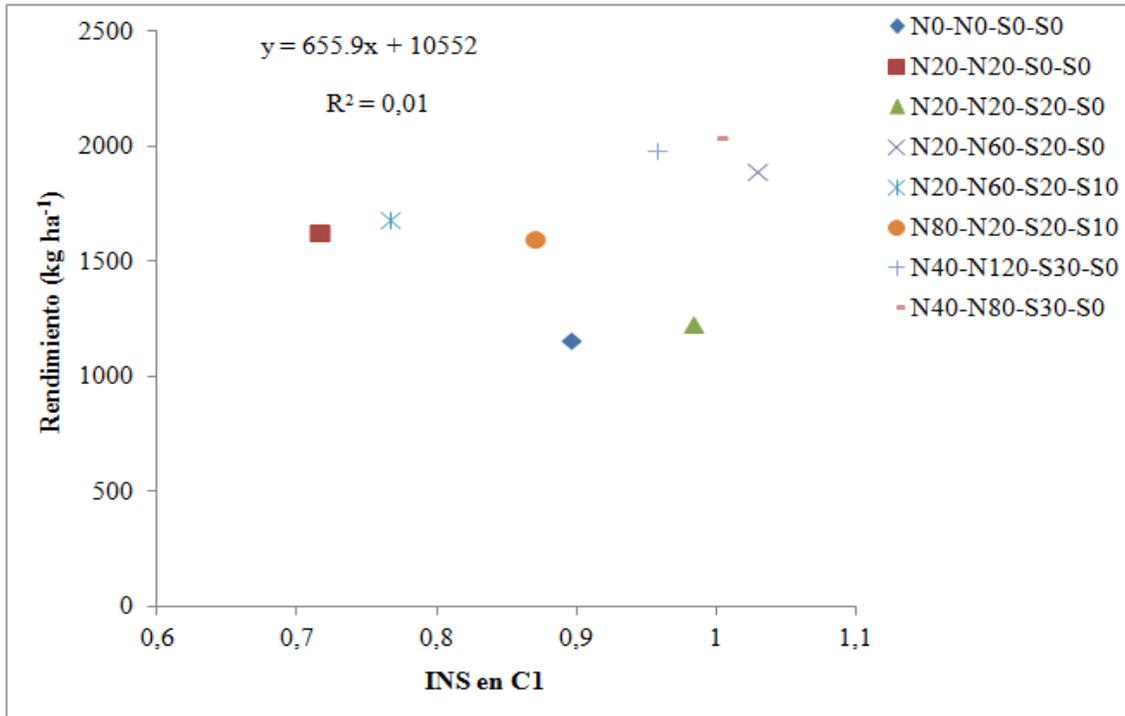


Figura 32. Relación entre rendimiento y el INS en C1 promedio por tratamiento.

Si consideramos el INS crítico de 0,74 para la producción de grano calculado por Ferreira (2014), todas las parcelas se encontraron en posición de S no limitante para el rendimiento (Figura 32), sin embargo el rendimiento también es limitado por la deficiencia de nitrógeno la cual está presente en todas las parcelas. Un mejor nivel nutricional para azufre mejora la respuesta a la aplicación de nitrógeno, esto puede afirmarse ya que el tratamiento N20-N60-S20-S0 tiene un valor de INS mayor a 1, en cambio N20-N60-S20-S10 tiene un valor menor a 0,8 lo cual indica una menor concentración de S en planta, ambos tratamientos tiene iguales dosis de nitrógeno, pero sin embargo el primero tiene un mejor estatus nutricional en azufre permitiéndole concretar un rendimiento unos 200 kg de grano ha⁻¹ más que N20-N60-S20-S10.

5. CONCLUSIONES

Las condiciones de temperatura y precipitación ocurridas durante el ciclo del cultivo condicionaron la respuesta de los tratamientos estudiados, ya que ocurrieron deficiencias hídricas durante el período crítico y temperaturas por encima de las óptimas durante el período post-floración.

El potencial de rendimiento no sólo fue afectado por las condiciones climáticas sino también por el bajo aporte de nitrógeno del suelo, lo cual puede ser una consecuencia de la larga historia agrícola de la chacra. Este bajo aporte de nitrógeno provocó que el crecimiento del cultivo estuviese limitado obteniéndose bajas producciones de materia seca al estadio C1 y por ende bajos rendimientos finales.

El agregado de nitrógeno y azufre tuvo un impacto importante sobre las variables evaluadas. De los componentes numéricos del rendimiento, el número de granos por metro cuadrado fue el de mayor importancia en el rendimiento alcanzado, siendo influenciado por el número de silicuas por metro cuadrado debido a que el número de granos por silicua se mantuvo estable para un amplio rango de oferta de nutrientes.

La interacción de nitrógeno y azufre influyó en la respuesta al agregado de nitrógeno en C1, ya que el máximo rendimiento alcanzado cuando el azufre fue limitante fue de 2270 kg ha⁻¹ lográndose con una dosis de 120 kg N ha⁻¹, siendo este valor inferior a los 2946 kg ha⁻¹ logrados con un aporte de 80 kg N ha⁻¹ cuando el contenido de azufre en planta no fue limitante. Dicho de otra manera, la respuesta al nitrógeno disminuye cuando el azufre es limitante.

Una mayor absorción de azufre en relación a nitrógeno determino que el tratamiento N80-N20-S20-S10 presentara los valores de % MG en grano más elevados 49% corroborando la influencia del azufre en la concentración de aceite.

Se determinó que la disponibilidad de nitrógeno en el ensayo tuvo un mínimo de 26 kg N ha⁻¹ y un máximo de 186 kg N ha⁻¹ lo que genero diferentes EAUN ya que a mayor disponibilidad menor es la eficiencia, la disponibilidad crítica a partir de la cual la eficiencia no disminuye es de 150 kg N ha⁻¹ disponible (suelo + fertilizante) determinando una eficiencia de 10,8 kg de grano por kg de nitrógeno disponible. Los valores de eficiencias mencionados son considerados buenos para este cultivo.

La falta de valores con INN de suficiencia dificulto la validación de los índices, indicando que ninguna de las dosis de nitrógeno previo a elongación fueron capaces de lograr de levantar esa limitante, sin embargo un tercio de las parcelas presentaron suficiencia para INS para la producción de materia seca en C1 y rendimiento. Para lograr

un INN no limitante deberían absorberse unos 80 kg N ha⁻¹ en C1, en cuanto para INS se necesito absorber en promedio 15,2 kg S ha⁻¹. El valor reportado por Ferreira (2014) de 0,88 INS para la máxima producción de MS en elongación coincidió con el valor encontrado en este trabajo.

Como en promedio todas las parcelas presentaban INN limitantes, se busco la dosis de nitrógeno que mejor corrigiera esa deficiencia para así lograr los rendimientos más altos, dosis de 80 kg N ha⁻¹ en C1 fueron las que mejor corrigieron la deficiencia lo cual permitió obtener los mayores rendimientos, logrando un beneficio de 885 kg ha⁻¹ de grano en relación al N0-N0-S0-S0. Lográndose una eficiencia promedio del fertilizante aplicado para los tratamientos que recibieron un aporte de N de 6,6 kg de grano por cada unidad de nitrógeno aplicada.

6. RESUMEN

El cultivo de colza no ha podido consolidarse en el sistema de producción uruguayo a pesar de ser la única alternativa invernal a los cultivos de trigo y cebada. Posee varias características que hacen posible su inclusión dentro del sistema de rotación, sin embargo, la falta de ajuste de la fertilización es una gran limitante para la obtención de altos rendimientos. En este trabajo fue instalado un experimento en una perteneciente a la empresa Kilafen a 30 km al sur de la ciudad de Paysandú. El objetivo fue evaluar la respuesta del cultivo al agregado de distintas combinaciones de nitrógeno y azufre, la fertilización se fraccionó a siembra y al estadio C1. Se evaluó el rendimiento en grano y contenido de aceite, se estimaron los componentes numéricos del rendimiento, y se determinó el contenido de N y S en planta y materia seca producida en 4 momentos del ciclo. Se calculó la eficiencia (agronómica, fisiológica y de absorción) de uso para los nutrientes evaluados y la eficiencia de uso del fertilizante. También fueron calculados los índices nutricionales para N y S. Durante el ciclo del cultivo las precipitaciones fueron muy variables, provocando que parte del período crítico el cultivo estuviese sometido a un déficit hídrico que repercutió negativamente sobre el rendimiento. Al evaluar los componentes numéricos del rendimiento se pudo observar que el número de granos m^{-2} y número de silicuas m^{-2} fueron los de mayor variación frente a cambios en la disponibilidad de N y por lo tanto los de mayor importancia en el rendimiento, mientras que el peso de grano y el número de granos por silicua se vieron poco influenciados por la disponibilidad de N. Por otro lado, el índice de cosecha y el % de materia grasa se mantuvieron estables para los tratamientos evaluados. Para el rango de N disponible, el cual varió entre un mínimo y un máximo de 26 kg N ha^{-1} y 186 kg N ha^{-1} respectivamente, se encontró un nivel crítico de 150 kg N ha^{-1} , a partir de dicho punto se ubicó la eficiencia agronómica de uso del nitrógeno mínima la cual fue de 10,8 kg grano kg N disponible. La eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno presentó poca variación y tomó un valor de 23,9 kg grano kg de N absorbido, siendo dicho valor muy similar a lo reportado en la bibliografía. La eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado promedio del ensayo fue de 6,6 kg grano por unidad de nitrógeno aplicado. Con los tratamientos aplicados previo a elongación no fue posible obtener un índice nutricional nitrogenado no limitante, lo que dificultó la validación del modelo propuesto por Ferreira. Sin embargo para el índice nutricional azufrado para producción de materia seca en C1 pudo comprobarse que el valor de 0,88 obtenido por Ferreira determinó la mayor producción de materia seca en este ensayo, al superar dicho valor la materia seca producida disminuye. Para alcanzar la condición de S no limitante se debió absorber una cantidad mínima de 9 kg S ha^{-1} .

Palabras clave: Canola; Nitrógeno; Azufre; Rendimiento; Eficiencia de uso.

7. SUMMARY

The rape crop has not been consolidated in the Uruguayan production system despite being the only winter alternative to wheat and barley crops. It has several characteristics that make possible its inclusion within the rotation system, however, the lack of adjustment of the fertilization is a great limitation for obtaining high yields. In this work was installed an experiment in one belonging to the company Kilafen to 30 km to the south of the city of Paysandú. The objective was to evaluate the response of the crop to the aggregate of different combinations of nitrogen and sulfur, fertilization was fractionated to planting and to stage C1. The grain yield and oil content were evaluated, the numerical components of the yield were estimated and the N and S content in the plant and dry matter produced at 4 times of the cycle were determined. The efficiency (agronomic, physiological and absorption) of use for the evaluated nutrients and the efficiency of fertilizer use was calculated. The nutritional indexes were also calculated for N and S. During the crop cycle the precipitations were very variable, causing that part of the critical period the crop was subjected to a water deficit that had a negative impact on yield. The number of grains m⁻² and number of m⁻² silica showed the greatest variation in the availability of N and therefore the most important in the yield, while the grain weight and the number of grains per silica were little influenced by the availability of N. On the other hand, the crop index and the % fat content were stable for the evaluated treatments. For the available N range, which ranged from a minimum to a maximum of 26 kg N ha⁻¹ and 186 kg N ha⁻¹ respectively, a critical level of 150 kg N ha⁻¹ was found from that point Was the agronomic efficiency of use of the minimum nitrogen which was of 10.8 kg grain kg N available. The physiological efficiency of nitrogen use showed little variation and took a value of 23.9 kg grain kg of N absorbed, this value being very similar to that reported in the literature. The average nitrogen fertilizer use efficiency of the test was 6.6 kg grain per unit of nitrogen applied. With the treatments applied before elongation it was not possible to obtain a non-limiting nitrogen nutritional index, which made it difficult to validate the model proposed by Ferreira. However, for the sulfur nutrient index for dry matter production in C1 it was possible to verify that the value of 0.88 obtained by Ferreira determined the highest dry matter production in this test. To reach the non-limiting S condition, a minimum quantity of 9 kg S ha⁻¹ must have been absorbed.

Keywords: Canola; Nitrogen; Sulfur; Grain yield; Efficiency of use.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Adrover, J.; Ferreira, M. 2012. Respuesta a la fertilización nitrogenada en elongación según nivel nutricional en el cultivo de canola (*Brassica napus*). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 79 p.
2. Agosti, M. B. 2011. Fertilización nitrógeno-azufrada y variabilidad genotípica en el rendimiento y la calidad del grano en colza-canola (*Brassica napus* L.). Tesis Magister en Producción Vegetal. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. 148 p.
3. Aguirre, M.; Uriarte, I. 2010. Respuesta del cultivo de colza-canola (*Brassica napus*) a las condiciones físico-químicas del suelo a nivel de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 36 p.
4. Ahmad, A.; Khan, I.; Abdin, M. Z. 2000. Effect of sulfur fertilisation on oil accumulation, acetyl-CoA concentration, and acetyl-CoA carboxylase activity in the developing seed of rapeseed (*Brassica campestris* L.). Australian Journal of Agriculture Research. 51: 1023-1029.
5. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo; guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. pp. 156-208 (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 56).
6. Almond, J. A.; Dawkins, T. C. K.; Askew, M. F. 1986. Aspects of crop husbandry. In: Daniels, R. W.; Scarisbrick, D. H.; Smith, L. J. eds. Oilseed rape. London, Collins. pp. 127-165.
7. Anderson, J. W. 1990. Sulfur metabolism in plants. In: Stumpf, P. K.; Conn, E. E. eds. The biochemistry of plants; a comprehensive treatise. San Diego, Academic Press. pp. 327-381.
8. Andrade, F. H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. Field Crops Research. 41: 1-12.
9. Asare, E.; Scarisbrick, D. H. 1995. Rate of nitrogen and sulphur fertilizers on yield, yield components and seed quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Field Crops Research. 44: 41-46.

10. Barbieri, P. A.; Sainz Rosas, H. Echeverría, H. E. 2008. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Canadian Journal Plant Science*. 88: 849-857.
11. Boaretto, A. E.; Muraoka, T.; Trevelin, P. 2008. Uso eficiente del nitrógeno de los fertilizantes convencionales. *Informaciones Agronómicas*. no. 68: 13-14.
12. Burzaco, J. P.; Ciampitti, I.; García, F. 2009. Mejores prácticas de manejo para la nutrición del cultivo de colza-canola; una revisión. *Información Agronómica del Cono Sur*. no. 42: 1-8.
13. Canola Council of Canadá, CA. 2013. Canola encyclopedia; crop nutrition. (en línea). Winnipeg, Manitoba. s.p. Consultado 10 oct. 2016. Disponible en <http://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/crop-nutrition/crop-nutrition/>
14. CETIOM (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains, FR). 1978. Stades reperes du colza. (en línea). s.l. s.p. Consultado 10 oct. 2016. Disponible en <http://www.terresinovia.fr/colza/cultiver-du-colza/atouts-rendez-vous/stades-reperes/>
15. Chamorro, A. M.; Tamagno, N. 2004. Producción de materia seca aérea y radical de colza primaveral (*Brassica napus* L. ssp oleífera forma annua). *Revista Facultad de Agronomía (La Plata)*. 105 (2): 53-62.
16. Ciampitti, A. I.; García, F. O. 2009. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macro nutrientes y nutrientes secundarios. (en línea). Buenos Aires, IPNI. pp. 13-16. Consultado 05 set. 2016. Disponible en <http://lacs.ipni.net/beagle/LACS-1081&f=AA%2011.pdf>
17. Colnenne, C.; Meynard, J. M.; Reau, R.; Justes, E.; Merrien, E. 1998. Determination of critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of Botany*. 81: 311-317.
18. Connor, D. J.; Sadras, V. O. 1992. Physiology of yield expression in sunflower. *Field Crops Research*. 30: 333-389.
19. Cordeiro, D. S.; Silveira, P. E.; Kichel, A, N. 1993. Resposta da *Brassica napus* a doses e épocas de aplicação de nitrogenio. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. (28) 10: 1137-1142

20. Dardanelli, J.; Collino, D.; Otegui, M. E.; Sadras, V. O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. In: Satorre, E. H.; Benech, R. L.; Slafer, G. A.; de la fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 377-406.
21. De Caram, G.; Angeloni, P.; Prause, J. 2007. Determinación de la curva de dilución de nitrógeno en diferentes fases fenológicas del girasol. *Agricultura Técnica*. 67 (2): 189-195.
22. Díaz, P.; Borsani, O.; Monza, J. 1999. Acumulación de prolina en plantas en respuesta al estrés osmótico. *Agrociencia* (Montevideo). 3 (1): 1-10.
23. Diepenbrock, W. 2000. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.); a review. *Field Crops Research*. 67: 25-49.
24. Din, J.; Khan, S. U.; Ali, I.; Gurmani, A. R. 2011. Physiological and agronomic response of canola varieties to drought stress. *The Journal of Animal and Plant Sciences*. 21(1): 78-82.
25. Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. 2015. Infostat versión 2015. Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. FCA. Grupo Infostat. s.p.
26. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2011. Semillas oleaginosas, aceites y harinas. *Perspectivas Alimentarias*. Roma. pp. 48-55.
27. Ferraris, G.; Salvagiotti, F.; Prystupa, P.; Gutiérrez Boem, F. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. In: Congreso de la Ciencia del Suelo (19°.., 2004, Paraná Entre Ríos, Argentina). Trabajos presentados. *Informaciones Agronómicas*. no. 23: s.p
28. Ferreira, G. D. 2014. Diagnóstico y manejo de la fertilización nitrogenada en el cultivo de colza (*Brassica napus* L.). Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 67 p.
29. Fismes, J.; Vong, P.C.; Guckert, A.; Frossard, E. 2000. Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *European Journal of Agronomy*. 12: 127-141.

30. García, F. 1996. El nitrógeno en ecosistemas agrícolas. INTA. Boletín técnico no. 140: 1-11.
31. Gastal, F.; Lemaire, G. 2002. N uptake and distribution in crops; an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*. 53 (370): 789-799.
32. Gómez, B. L.; Cepeda, M. A. 2010. Efecto de la fertilización química y organomineral sobre la producción de canola en secano bajo labranza reducida en Michoacán. *Información Técnica Económica Agraria*. 106 (3): 170-183.
33. Gómez, N. V.; Miralles, D. J. 2006. Colza. *In*: de la fuente, E. B.; Gil, A.; Gimenez, P. I.; Kantolic, A. G.; López Pereira, M.; Ploschuck, E. L.; Sorlino, D. M.; Vilariño, M. P.; Wassner, D. F.; Windauer, L. B. eds. *Cultivos industriales*. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 183-216.
34. González Montaner, J.; Di Napoli, M. 2009. Manejo de la fertilización en cultivos de cosecha fina en el contexto actual de relaciones de precios y situación financiera de las empresas en la zona Mar y Sierras. (en línea). Buenos Aires, IPNI. s.p. Consultado 05 set. 2016. Disponible en <http://lacs.ipni.net/beagle/LACS-1151&f=Montaner%20IPNI%202009.pdf>
35. Grant, C. A.; Bailey, L. D. 1993. Fertility management in canola production. *Canadian Journal of Plant Science*. 73: 651-670.
36. Greenwood, D. J. 2001. Modeling N-response of yield vegetable crops grown under diverse conditions with N-able; a review. *Journal of Plant Nutrition*. 24(11): 1799-1815.
37. Habekotté, B. 1997. Identification of strong and weak yield determining components of winter oilseed rape compared with Winter wheat. *European Journal of Agronomy*. 7: 315-321.
38. Hocking, P. J.; Kirkegaard, J. A.; Angus, J. F.; Gibson, A. H.; Koetz, E. A. 1997. Comparison of canola, Indian mustard and Linola in two contrasting environments. I. Effects of nitrogen fertilizer on dry-matter production, seed yield and seed quality. *Field Crops Research*. 49: 107-125.

39. INIA; INASE (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY; Instituto Nacional de Semillas, UY). 2015. Evaluación de cultivares de invierno; convenio INIA-INASE. (en línea). Montevideo, INIA. 85 p. Consultado 22 nov. 2016. Disponible en http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CI/Ano2015/JornadaInvierno2016.pdf
40. Iriarte, L. B. 2002. Colza; cultivares, fecha de siembra, fertilización. Tres Arroyos, INTA. Chacra Experimental Integrada Barrow. 4 p.
41. Janzen, H. H.; Bettany, J. R. 1984. Sulfur nutrition of rapeseed; II. Effect of time of sulfur application. *Soil Science Society Journal*. 48: 107-112.
42. Justes, E.; Mary, B.; Meynard, J. M.; Machet, J. M.; Thelier-Huches. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*. 74: 397-407.
43. _____.; Denoroy, P.; Gabrielle, B.; Gosse, G. 2000. Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. *European Journal of Agronomy*. 13: 165-177.
44. Karamanos, R. E.; Goh, T. B.; Flaten, D. N. 2007. Nitrogen and sulphur fertilizer management for growing canola on sulphur sufficient soils. *Canadian Journal of Plant Science*. 87 (2): 201-210.
45. Larcher, W. 2004. Physiological plant ecology. *Annals of Botany*. 93 (5): 616-617.
46. Lemaire, G.; Van Oosterom, E.; Jeuffroy, M-H.; Gastal, F.; Massignam, A. 2008. Crop species present different qualitative types of response to N deficiency during their vegetative growth. *Field Crops Research*. 105: 253-265.
47. Malhi, S. S. 1999. Restoring canola yield by applying sulphur fertilizer during the growing season. *In: Agrium Symposium; Sulfur Fertility and Fertilizers (1999, Calgary, CA)*. Correcting sulphur deficiency in canola. Calgary, s.e. pp. 51-55.
48. _____.; Gill, K. S. 2006. Cultivar and fertilizer S rate interaction effects on canola yield, seed quality and S uptake. *Canadian Journal of Plant Science*. 86(1): 91-98.

49. Martino, D. L.; Ponce De León, F. 1999. Canola; una alternativa promisorio. Montevideo, INIA. 98 p. (Serie Técnica no. 105).
50. Maynard, D. G.; Stewart, J. W. B.; Bettany, J. R. 1983. Use of plant analysis to predict sulfur deficiency in rapeseed (*Brassica napus* and *B. campestris*). Canadian Journal of Soil Science. 63: 387-396.
51. Mazzilli, S. R.; Hoffman, E. 2010. Respuesta a la fertilización con azufre en el cultivo de colza-canola en suelos del litoral norte de Uruguay. Informaciones Agronómicas. 46: 18-21
52. _____.; Elizarrú, A.; Locatelli, A. 2014. Desarrollo tecnológico de la colza en Uruguay. (en línea). In: Simposio Latino Americano de Canola (1º., 2014, Passo Fundo, RS, BR). Memorias. Brasilia, EMBRAPA Trigo. s.p. Consultado 25 abr. 2016. Disponible en [http://www.cnpt.embrapa.br/slac/cd/pdf/Mazilli%20-%20Desarrollo...%20\(%20Investigacion\)%20de%20la%20colza%20en%20Uruguay..pdf](http://www.cnpt.embrapa.br/slac/cd/pdf/Mazilli%20-%20Desarrollo...%20(%20Investigacion)%20de%20la%20colza%20en%20Uruguay..pdf)
53. Miller, P. R.; Angadi, S.V.; Androsoff, G. L.; Mcconkey, B. G.; McDonald, C. L.; Brandt, S. A.; Cutforth, H. W.; Entz, M. H.; Volkmar, K. M. 2003. Comparing Brassica oilseed crop productivity under contrasting N fertility regimes in the semiarid northern Great Plains. Canadian Journal of Plant Science. 83(3): 489-497.
54. Miralles, D. J.; Windauer, L. B.; Gómez, N. V. 2003. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de grano. In: Satorre, E. H.; Benech, R. L.; Slafer, G. A.; de la fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 61-74
55. Orcellet, J. M.; Reussi Calvo, N. I.; Echeverría, H. E.; Sainz Rozas, H. R.; Diovisalvi, N.; Berardo, A. 2015. Eficiencia de uso de nitrógeno en cebada en el sudeste bonaerense: efecto de aplicaciones divididas. Ciencia del Suelo (Argentina). 33(1): 97-105.
56. Orlovius, K. 2003. Oilseed rape; fertilizing for high yield and quality. (en línea). Basel, Switzerland, International Potash Institute. 125 p. (IPI bulletin no. 16). Consultado 7 set. 2016. Disponible en <https://www.ipipotash.org/udocs/No%2016%20Oilseed%20rape.pdf>

57. Peltonen-Saino, J.; Jauhiainen, L. 2008. Association of growth dynamics, yield components and seed quality in long-term trials covering rapeseed cultivation history at high latitudes. *Field Crops Research*. 108: 101-108.
58. Perdomo, C. H.; Barbazán, M.; Durán Monzoni, J. M. 2008. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
59. Pinkerton, A. 1998. Critical sulfur concentrations in oilseed rape (*Brassica napus*) in relation to nitrogen supply and to planta age. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 38: 511-522.
60. Planchón Guigou, M.; Figares Espósito, H. J. 2004. Fertilización en colza-canola (*brassica napus* l.). Fenología y época de siembra en cultivares de *b. Napus*, *b. Rapa* y *b. Juncea*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 179 p.
61. Qaderi, M. M.; Kurepin, L. V.; Reid, D. M. 2006. Growth and physiological responses of canola (*Brassica napus*) to three components of global climate change; temperature, carbon dioxide and drought. *Physiologia Plantarum*. 128: 710-721.
62. Renard, M.; Louter, J. H.; Duke, L. H. 1994. Oilseed rape (en línea). Paris, s.e. s.p. Consultado 01 set. Disponible en <http://www.oecd.org/science/biotrack/1946212.pdf>
63. Reussi, N.; Echeverría, H. E.; Sainz Rozas, H. 2012. Stability of foliar nitrogen; sulfur ratio in spring red wheat and sulfur dilution curve. *Journal of Plant Nutrition*. 35(7): 990 - 1003.
64. Rondanini, D. P.; Gómez, N. V.; Agosti, M. B.; Miralles, D. J. 2012. Global trends of rapeseed grain yield stability and rapessed-to-wheat yield ratio in the last four decades. *European Journal of Agronomy*. 37: 56-65.
65. Salvagiotti, F.; Castellarín, J. M.; Miralles, D. J.; Pedrol, H. M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research*. 113: 170-177.
66. Si, P.; Walton, G. H. 2004. Determinants of oil concentration and seed yield in canola and Indian mustard in the rainfall areas of western Australia. *Australian Journal of Agriculture Research*. 55: 367-377.

67. Siaudinis, G.; Butkutė, B. 2013. Responses of spring oilseed rape seed yield and quality to nitrogen and sulfur fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 44: 145-157.
68. Silveira, J. P.; Mazzilli, S. 2015. La colza como alternativa invernal. (en línea). In: Jornada Cultivos de Invierno (3a., 2015, Mercedes, Uruguay). Memorias. Montevideo, CREA. s.p. Consultado 21 abr. 2016.
<http://www.fucrea.org/informacion/index.php?TypeId=15&ClassId=46&Id=1467>.
69. Small, E. 2009. Top 100 food plants. The world's most important culinary crops. Ottawa, Ontario, Canadá, Agriculture and Agri-food Canadá. 636 p.
70. Smil, V. 1999. Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles*. 13(2): 647-662.
71. Tamagno, L. N.; Chamorro, A. M.; Sarandón, S. J. 1999. Aplicación fraccionada de nitrógeno en colza (*Brassica napus* L. Spp oleífera forma anual): efectos sobre el rendimiento y la calidad de la semilla. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 104 (1): 25-34.
72. Tayo, T. O.; Morgan, D. G. 1975. Quantitative analysis of the growth, development and distribution of flowers and pods in oil seed rape (*Brassica napus* L.). *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*. 85: 103-110.
73. Thomas, P. 1995. Canola growers manual. (en línea). Manitoba, Canada, Canola Council of Canada. s.p. Consultado 24 abr. 2016. Disponible en <http://www.canolacouncil.org/crop-production/canola-grower's-manual-contents>
74. Tilman, D.; Cassman, K. G.; Matson, P. A.; Naylor, R.; Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418: 671-677.
75. Wang, N.; Qian, W.; Suppanz, I.; Wei, L.; Mao, B.; Long, Y.; Meng, J; Muller, A.; Jung, C. 2011. Flowering time variation on oilseed rape (*Brassica napus* L.) is associated with allelic variation in the FRIGIDA homologue BnaA.FRI.a. *Journal of Experimental Botany*. 62: 1-18
76. Zamora, M.; Massigoge, J. 2008. Fertilización de colza: respuesta a la aplicación de N y S en el centro-sur bonaerense. In: Congreso Argentino de la Ciencia

del Suelo (21°. 2008, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina).
Trabajos presentados. San Luis, Asociación Argentina de la Ciencia del
Suelo. s.p.

77. Zhao, F.; Mcgrath, S. P. 1994. Extractable sulphate and organic sulphur in soils and their availability to plants. *Plant and Soil*. 164: 243-250.

9. ANEXOS

1. Ubicación de los tratamientos dentro de los distintos bloques del ensayo.

4 1	8 2	2 3	5 4	3 5	1 6	6 7	7 8	B I
1 9	6 10	7 11	2 12	5 13	8 14	3 15	4 16	B II
7 17	5 18	3 19	4 20	8 21	2 22	1 23	6 24	B III



Números en rojo: tratamientos
Números en negro: parcelas

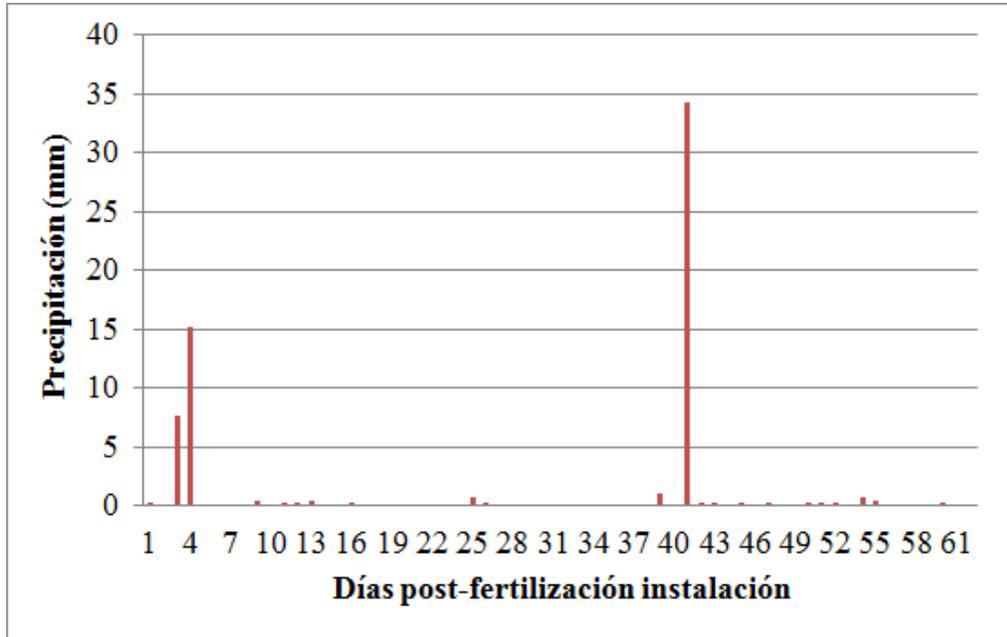
2. Características químicas determinadas del suelo a instalación del ensayo.

	Ph (H₂O) 0-20 cm	Ph (H₂O) 0-40 cm	pH (KCl) 0-20 cm	pH KCl 20-40 cm	N- NO₃ 0-20 cm	N- NO₃ 20-40 cm	N- NH₄ 0-20 cm	N- NH₄ 20-40 cm	S- SO₄ 0-20 cm	S- SO₄ 20-40 cm
B I	6,0	6,1	5,0	5,1	5,0	5,5	4,8	5,2	5,5	7,1
B II	5,9	6,1	5,0	5,1	3,8	4,0	7,4	4,9	1,8	1,6
B II I	5,9	6,1	5,0	5,1	5,5	4,2	6,1	5,8	3,0	3,5

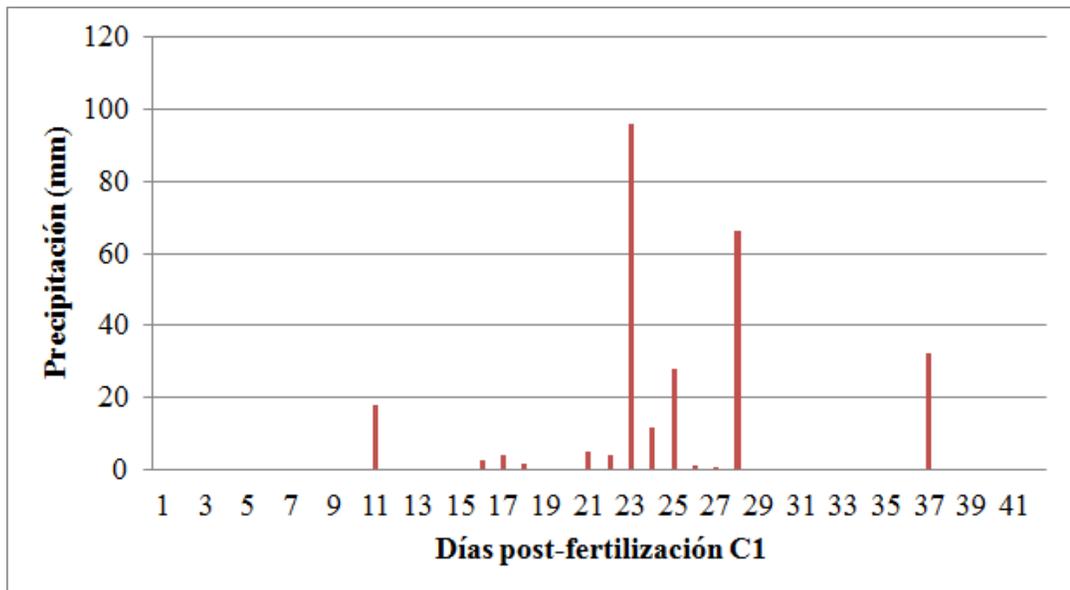
3. Características químicas determinadas del suelo cuando el cultivo se encontraba en el estadio B4.

Bloque	Parcela	pH	pH	N-NO3	N-NH4	S-SO4
		(H2O)	(KCl)	µg N/g	µg N/g	µg S/g
B I	1	5,9	5,0	5,1	13,0	4,8
B I	2	5,8	5,0	9,5	16,4	6,0
B I	3	5,9	5,0	7,4	11,8	6,5
B I	4	5,8	5,0	8,1	12,5	4,7
B I	5	5,9	5,1	7,7	11,8	8,3
B I	6	5,9	5,0	13,1	17,6	5,8
B I	7	5,8	5,1	7,8	15,0	8,0
B I	8	5,7	5,0	12,1	13,5	15,3
B II	1	5,8	5,0	6,7	10,7	5,0
B II	2	5,8	5,0	8,3	18,9	4,6
B II	3	5,8	5,0	8,1	12,1	9,4
B II	4	5,7	5,0	8,8	13,4	10,5
B II	5	5,8	5,0	8,1	13,5	7,7
B II	6	5,8	5,0	9,4	13,7	6,0
B II	7	5,8	5,0	8,5	17,4	8,6
B II	8	5,8	5,0	9,1	12,5	10,9
B III	1	5,8	5,0	6,5	10,1	7,0
B III	2	5,6	4,9	22,4	12,5	5,7
B III	3	5,6	5,0	8,2	12,5	9,2
B III	4	5,6	4,9	8,7	9,2	8,3
B III	5	5,8	5,0	9,1	12,4	8,0
B III	6	5,7	5,0	9,9	12,7	11,6
B III	7	5,7	5,0	8,5	13,1	16,1
B III	8	5,5	4,8	12,4	12,2	12,6
B I	0-20	6,0	5,0	5,0	4,8	5,5
B I	20-40	6,1	5,1	5,5	5,2	7,1
B II	0-20	5,9	5,0	3,8	7,4	1,8
B II	20-40	6,1	5,1	4,0	4,9	1,6
B III	0-20	5,9	5,0	5,5	6,1	3,0
B III	20-40	6,1	5,1	4,2	5,8	3,5

4. Precipitaciones ocurridas luego de la primera aplicación de fertilizante



5. Precipitaciones ocurridas luego de la segunda aplicación de fertilizante



6. Biomasa acumulada (kg ha^{-1}) para los tratamientos evaluados medida en los estadios B4, C1, F2 y cosecha.

Tratamiento	B4		C1		F2		Cosecha	
	kg MS/ha	%	kg MS/ha	%	kg MS/ha	%	kg MS/ha	%
N0-N0-S0-S0	52,3	1,3	1420,3	34,3	2702,6	65,2	4146,2	100
N20-N20-S0-S0	60,1	1,1	1042,1	18,6	4504,4	80,4	5599,4	100
N20-N20-S20-S0	75,6	1,6	1326,8	28,3	3608,8	76,9	4693,0	100
N20-N60-S20-S0	72,5	1,2	1114,7	17,7	4964,5	79,0	6283,6	100
N20-N60-S20-S10	71,1	1,1	1250,9	20,2	3355,3	54,1	6198,8	100
N80-N20-S20-S10	75,4	1,5	1279,1	26,2	4625,4	94,7	4883,0	100
N40-N120-S30-S0	94,5	1,4	1403,3	20,5	5142,1	75,0	6856,7	100
N40-N80-S30-S0	93,7	1,4	1320,1	19,3	5332,5	77,8	6850,9	100
Total general	74,4	1,3	1269,7	22,3	4279,4	75,2	5689,0	100

7. Tasa de absorción de N por estadio.

Tratamiento	Siembra-B4		B4-C1		C1-F2		F2-Cosecha	
N0-N0-S0-S0	0,06	B	1,42	A	-0,25	B	-0,08	A
N20-N20-S0-S0	0,08	AB	1,17	A	1,85	A	-1,85	AB
N20-N20-S20-S0	0,1	AB	1,25	AB	0,59	AB	-0,34	AB
N20-N60-S20-S0	0,09	AB	0,83	AB	2	A	-0,86	AB
N20-N60-S20-S10	0,09	AB	0,89	AB	1,14	AB	-0,32	AB
N40-N120-S30-S0	0,09	AB	1,09	AB	1,46	AB	-1,4	AB
N40-N80-S30-S0	0,13	A	1,11	AB	2,58	A	-1,98	B
N80-N20-S20-S10	0,12	A	1,13	AB	2,16	A	-1,5	AB

8. Tasa de absorción de S por estadio.

Tratamiento	Siembra-B4		B4-C1		C1-F2		F2-Cosecha	
N0-N0-S0-S0	0,01	AB	0,34	A	0,21	B	0,03	A
N20-N20-S0-S0	0,01	AB	0,24	AB	0,53	AB	-0,22	A
N20-N20-S20-S0	0,01	AB	0,31	AB	0,38	AB	-0,23	A
N20-N60-S20-S0	0,01	AB	0,25	AB	0,71	AB	-0,28	A
N20-N60-S20-S10	0,01	AB	0,2	AB	0,55	AB	0,06	A
N40-N120-S30-S0	0,01	AB	0,25	AB	0,87	AB	-0,44	A
N40-N80-S30-S0	0,02	A	0,3	AB	0,9	AB	-0,52	A
N80-N20-S20-S10	0,02	AB	0,3	AB	0,95	A	-0,23	A

9. Niveles crítico de N y S según la ecuación de Ferreira, y % de N y S en planta según análisis para todas las parcelas del ensayo.

	Tratamiento	Nc de N en C1	N% C1	Nc de S en C1	% S C1
Bloque I	N0-N0-S0-S0	5,91	3,07	1,07	0,61
	N20-N20-S0-S0	5,90	5,52	1,07	0,70
	N20-N20-S20-S0	5,63	4,70	1,06	0,91
	N20-N60-S20-S0	5,27	4,15	1,03	1,00
	N20-N60-S20-S10	5,95	5,19	1,08	0,91
	N80-N20-S20-S10	5,43	4,60	1,04	1,06
	N40-N120-S30-S0	4,96	4,69	0,99	1,01
	N40-N80-S30-S0	6,28	4,37	1,10	0,73
Bloque II	N0-N0-S0-S0	4,87	4,09	0,98	0,86
	N20-N20-S0-S0	5,03	4,66	1,00	0,82
	N20-N20-S20-S0	4,32	3,76	0,90	1,02
	N20-N60-S20-S0	5,06	3,12	1,00	0,98
	N20-N60-S20-S10	4,10	2,72	0,86	0,57
	N80-N20-S20-S10	4,41	3,89	0,92	1,05
	N40-N120-S30-S0	4,81	4,08	0,97	0,93
	N40-N80-S30-S0	4,59	4,05	0,94	1,09
Bloque III	N0-N0-S0-S0	3,83	4,07	0,80	1,00
	N20-N20-S0-S0	4,72	2,30	0,96	0,66
	N20-N20-S20-S0	4,51	3,73	0,93	0,89
	N20-N60-S20-S0	4,75	3,70	0,97	1,10
	N20-N60-S20-S10	5,00	2,79	1,00	0,79
	N80-N20-S20-S10	4,67	2,99	0,96	0,43
	N40-N120-S30-S0	4,20	2,36	0,88	0,79
	N40-N80-S30-S0	4,10	3,86	0,86	1,02

10. Relación entre rendimiento y las eficiencias agronómicas para N y S (EAUN y EAUS).

