

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DIAGNÓSTICO Y MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN**  
**NITROGENADA EN EL CULTIVO DE COLZA (*Brassica napus l.*)**

**por**

Gonzalo Ramón **FERREIRA DONNINI**

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el título  
de Magíster en Ciencias Agrarias en  
la opción Ciencias Vegetales

MONTEVIDEO

URUGUAY

(Diciembre 2014)

Tesis aprobada con mención por el tribunal integrado por Ing. Agr. (PhD.)  
Mónica Barbazán, Ing. Agr. (PhD.) Andrés Berger, Ing. Agr. (Dr.) Daniel Miralles, el  
16 de Julio de 2014. Autor: Ing. Agr. Gonzalo Ferreira. Director Ing. Agr. (MSc)  
Oswaldo Ernst.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a mi familia por el apoyo incondicional durante todo el proceso y comprensión por los tiempos dedicados a la tesis.

En segundo lugar dejo un enorme agradecimiento al Ing. Agr. Oswaldo Ernst, tutor de tesis, por su espera en la maduración del trabajo y confianza depositada.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por el apoyo económico brindado durante el desarrollo del programa de maestría y en el financiamiento del proyecto de tesis.

A los tesisistas de grado Mario Ferreira y Juan Adrover por la colaboración en el desarrollo de la etapa de campo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	VIII
<b><u>1. INTRODUCCIÓN</u></b> .....	1
<b>1.1. OBJETIVOS</b> .....	3
<b><u>2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO NUTRICIONAL DEL CULTIVO DE COLZA (BRASSICA NAPUS) EN BASE A CURVAS DE DILUCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE</u></b> .....	4
<b>2.1. RESUMEN</b> .....	4
<b>2.2. SUMMARY</b> .....	4
<b>2.3. INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>2.4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	10
<b><u>2.4.1. Ensayos a campo</u></b> .....	11
<b><u>2.4.2. Ensayos en macetas</u></b> .....	11
<b><u>2.4.3. Determinaciones</u></b> .....	12
<b><u>2.4.4. Análisis del contenido de Nt, St y aceite</u></b> .....	12
<b><u>2.4.5. Análisis de datos</u></b> .....	12
<b>2.4.5.1. Evaluación de las curvas de dilución y los índices de nutrición.</b>	14
<b><u>2.4.6. Aceite en grano</u></b> .....	15
<b>2.5. RESULTADOS</b> .....	15
<b><u>2.5.1. Curvas de dilución de nitrógeno y azufre crítico</u></b> .....	15
<b><u>2.5.2. Índices de estado nutricional</u></b> .....	17
<b><u>2.5.3. Capacidad de pronóstico de los indicadores de estado nutricional.</u></b>	19
<b><u>2.5.4. Concentración de aceite en grano</u></b> .....	22
<b>2.6. DISCUSIÓN</b> .....	23

2.7. AGRADECIMIENTOS.....	25
2.8. BIBLIOGRAFÍA.....	25
<b><u>3. RESPUESTA DEL CULTIVO DE COLZA A LA FERTILIZACIÓN</u></b>	
<b><u>NITROGENADA</u></b> .....	30
3.1. RESUMEN.....	30
3.2. SUMMARY.....	30
3.3. INTRODUCCIÓN.....	31
<b><u>3.3.1. Requerimiento y respuesta del cultivo al nitrógeno</u></b> .....	31
<b><u>3.3.2. Efectos del nitrógeno sobre el cultivo</u></b> .....	33
<b><u>3.3.3. Interacción nitrógeno-azufre</u></b> .....	34
<b><u>3.3.5. Objetivo</u></b> .....	36
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
<b><u>3.4.1. Determinaciones</u></b> .....	37
<b><u>3.4.2. Análisis de datos</u></b> .....	37
3.4.2.1. Dosis óptima de nitrógeno según estado nutricional.....	37
3.4.2.3. Estado nutricional nitrogenado a elongación en base al manejo previo de la fertilización.....	38
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
<b><u>3.5.1. Dosis óptima de nitrógeno según estado nutricional en elongación..</u></b>	38
<b><u>3.5.2. Estado nutricional nitrogenado a elongación en base al manejo     previo de la fertilización</u></b> .....	40
3.6. CONCLUSIONES.....	44
3.7. BIBLIOGRAFÍA.....	45
<b><u>4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN GLOBAL</u></b> .....	49
<b><u>5. BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....	51
<b><u>6. ANEXOS</u></b> .....	59
<b>6.1. ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DETERMINADAS DE     LOS SUELOS EN ENSAYOS A CAMPO</b> .....	59

<b>6.2. ANEXO 2: CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERÍODO DE DESARROLLO DEL CULTIVO EN CADA SITIO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>59</b>
<b><u>6.2.1. El Puntal y La Esperanza (Dolores, 2010)</u>.....</b>	<b>59</b>
<b><u>6.2.1. El Palmar (Young, 2011)</u>.....</b>	<b>60</b>
<b><u>6.2.3. Villa Maruca (Dolores, 2011)</u>.....</b>	<b>60</b>

## RESUMEN

En la última década el cultivo de colza (*Brassica napus L.*) se ha incorporado paulatinamente a la rotación agrícola de Uruguay. Esta especie se caracteriza por elevados requerimientos nutricionales, especialmente de azufre (S). Este macro nutriente limita tanto la producción de grano como la de aceite, condicionando además, la respuesta a la disponibilidad de nitrógeno (N). El objetivo general de la presente investigación fue determinar indicadores de diagnóstico del estado nutricional nitrogenado y azufrado del cultivo de colza durante su ciclo de desarrollo y, en base a ello, proponer manejos correctivos mediante fertilización nitrogenada. Para ello se establecieron seis experimentos a campo y dos bajo invernadero en el litoral oeste del Uruguay entre los años 2010 y 2011. Se obtuvieron las ecuaciones de dilución para la concentración crítica de N y S ( $N_c=5,21 MS^{-0,36}$  y  $S_c=1,22e^{-0,18MS}$  respectivamente). A partir de éstas, el índice crítico de nutrición azufrada fue de 0,88 y 0,74 para la máxima producción de biomasa en elongación (C1) y grano respectivamente, para N solamente se encontró valor crítico de 1,04 para la producción de biomasa en C1. Para la producción de grano, bajo condición de S *suficiente*, no existió limitante de N en planta en todo el rango de estado nutricional estudiado y, en cambio, bajo la condición de S *limitante* la respuesta del rendimiento al estado nutricional nitrogenado fue lineal. Los resultados indican la necesidad de una cantidad mínima de S absorbida de 6 kg S ha<sup>-1</sup> para alcanzar un mínimo de 90 % de rendimiento relativo. Se obtuvo respuesta en rendimiento al agregado de N en C1 solamente para el rango de datos diagnosticados como N *limitante* y S *suficiente*. Para estas condiciones se determinó como dosis óptima de N en C1 la cantidad de 60 Kg N ha<sup>-1</sup>. Los niveles críticos de N absorbido necesarios para alcanzar niveles de INN no limitante en planta a C1 fueron de 54 y 143 Kg N ha<sup>-1</sup> para primaverales e invernales respectivamente, lo cual sugiere que el INN responde de igual forma al manejo previo de la fertilización en ambos tipos de colza.

A los resultados de la presente investigación deberían de sumarse más años de información para revalidar y/o confirmar los valores de los indicadores propuestos y definir dosis de fertilizante nitrogenado en base a rangos de estado nutricional dentro de la condición de N *limitante*.

**Palabras clave:** requerimiento nutricional, índice de nutrición, canola, predicción, curvas de dilución.

## DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF NITROGEN FERTILIZATION IN OILSEED RAPE (*Brassica napus* L.).

### SUMMARY

In the last decade cultivating rapeseed (*Brassica napus* L.) has gradually incorporated into agricultural rotation Uruguay. This species is characterized by high nutritional requirements, particularly sulfur (S). This macronutrient limits the production of grain and oil, as further conditioning, the response to the availability of nitrogen (N). The overall objective of this research was to determine diagnostic indicators of nitrogen and sulfur nutritional status of rapeseed cultivation during its development cycle and, based on this, propose corrective maneuvers by nitrogen fertilization. For this, five experiments to field and two green houses on the west coast of Uruguay between 2010 and 2011 were established. Dilution equations for the critical concentration of N and S ( $N_c = 5.21 MS^{-0.36}$  and  $S_c = 1.22 e^{-0.18MS}$ , respectively) were obtained. From these, the critical sulfur nutrition index was 0.88 and 0.74 for maximum biomass production in elongation (C1) and grain respectively, for N only critical value of 1.04 for production biomass C1 was found. For the production of grain, on condition of S enough, there was no limitation of N in plant throughout the range studied and nutritional status, however, under the condition S limiting yield response to nitrogen nutritional status was linear. The results indicate the need for a minimum of 6 Kg ha<sup>-1</sup> absorbed S to achieve a minimum of 90 % relative performance. Response was obtained in yield to added N in C1 only for the data range diagnosed as N limiting and S sufficient. For these conditions the amount of 60 Kg N ha<sup>-1</sup> was determined as optimal dose of N in C1. Critical levels of N uptake levels necessary to achieve INN not limiting plant in C1 were 54 and 143 Kg N ha<sup>-1</sup> for spring and winter respectively, suggesting that the INN responds similarly to the previous management fertilization in both types of rapeseed. The results of this investigation should add more years of data to validate and or confirm the values of the proposed indicators and define dose of nitrogen fertilizer based on ranges of nutritional status within the N limiting condition.

**Keywords:** nutritional requirement, nutritional index, canola, prediction, dilution curves.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la última década el cultivo de colza (*Brassica napus L.*) se ha incorporado paulatinamente a la rotación agrícola de Uruguay. Su inclusión de manera generalizada permitiría una mayor intensificación del uso del suelo, rotando con trigo y cebada, ya que no comparte enfermedades con estos cultivos. Si bien el área de siembra se ha mantenido en constante crecimiento, alcanzando en la zafra de invierno 2013 las 15 mil ha bajo contrato comercial con la industria aceitera (Ignacio Crosa, 2013, com. pers.), los bajos rendimientos y problemas de cosecha han limitado su crecimiento.

La colza es reconocida como un cultivo con elevados requerimientos nutricionales, destacándose por su relativamente alta demanda de S. Este macro nutriente limita tanto la producción de grano como la de aceite (Malhi *et al.*, 2007; Pinkerton, 1998), condicionando además, la respuesta a la disponibilidad de N (Zamora y Massigoge, 2008). Sin embargo, la fertilización ha sido manejada siguiendo criterios propuestos para gramíneas invernales y existen escasos antecedentes en la investigación local como para desarrollar propuestas de ajuste de dosis y momentos de aplicación para cubrir la demanda del cultivo.

Según Colnenne *et al.* (1998) este cultivo posee una demanda elevada de N y un mayor umbral de requerimiento en términos relativos que los demás cereales. Por lo tanto, la obtención de altos rendimientos de grano y aceite depende de un correcto diagnóstico de la nutrición nitrogenada y azufrada como herramienta para la toma de decisiones (Lemaire *et al.*, 2008). En este sentido, el análisis del tejido vegetal es una herramienta eficiente para evaluar la nutrición del cultivo, ya que el contenido de nutrientes en planta es un valor que resulta de la interacción entre el cultivo, el ambiente y el manejo. Esta herramienta se basa en los mismos principios que el análisis del suelo, asumiendo que la concentración de nutrientes en la planta está directamente relacionada con la habilidad del suelo para proporcionarlos y a su vez, con la productividad de las plantas (Correndo y García, 2012).

La concentración de N crítico es una referencia fundamental en cualquier etapa de crecimiento, ya que permite determinar si la nutrición nitrogenada de los cultivos es óptima o subóptima con respecto a la tasa de crecimiento del cultivo (Gastal y

Lemaire, 2002). Entre las metodologías que utilizan la determinación de N total en planta, las denominadas “curvas de dilución” son propuestas como una herramienta a ser utilizada en el diagnóstico de la nutrición nitrogenada (Colnenne *et al.*, 1998). La diferencia entre la concentración de N actual (Na) y el correspondiente nivel de N crítico (Nc) para una cantidad dada de biomasa aérea, indica la intensidad de la deficiencia de N (o exceso) experimentada por el cultivo. Varios autores han demostrado que la reducción en la tasa de crecimiento del cultivo es proporcional a la relación Na/Nc y han propuesto el uso de esta relación como un índice de nutrición nitrogenada (Colnenne *et al.*, 1998; Justes *et al.*, 1994; Lemaire *et al.*, 1997; Lemaire *et al.*, 1989), a partir del cual se puede predecir la respuesta del cultivo al agregado de N vía fertilizante (Tamagno *et al.*, 1999). Según algunos autores, la respuesta del cultivo al agregado de N depende no solamente del estado nutricional sino también del momento en el ciclo del cultivo en el cual se realice el suministro (Planchon y Figares, 2004; Tamagno *et al.*, 1999). Varios autores concuerdan en que es necesario mantener una buena disponibilidad del nutriente en torno al inicio de elongación de tallos (Chamorro y Tamagno, 2004; Iriarte y Valetti, 2002), momento de mayor demanda por parte del cultivo (Iriarte y Valetti, 2002) y etapa crítica en la determinación del rendimiento (Tayo y Morgan, citados por Tamagno *et al.*, 1999).

Las metodologías de diagnóstico de S basados 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 en el suelo (Maynard *et al.*, 1983; Lewis *et al.*, 1993; Zamora y Masigoge, 2008). Aunque un análisis de suelo puede aportar información sobre la disponibilidad de S para las plantas, no se han encontrado correlaciones elevadas entre el S extractable y el rendimiento obtenido (Zhao y McGrath, 1994; Zamora y Masigoge, 2008). Iriarte y Valetti (2002) afirman que se podría esperar una respuesta a la fertilización azufrada en suelos con bajos contenidos de materia orgánica, menos de 6 ppm de S-SO<sub>4</sub> antes de la siembra (0-60 cm), textura arenosa y lotes provenientes de agricultura continúa.

En general el análisis de planta es usado con mejores resultados que el análisis de suelo para conocer el nivel de azufre disponible para el cultivo. No obstante, la adición de fertilizantes nitrogenados generalmente incrementa el crecimiento

vegetativo y esto se traduce en una reducción de la concentración de azufre (Spencer y Freney, citados por Maynard *et al.*, 1983).

Si bien se reconoce la importancia del S en el cultivo no se acuerda sobre cuál pool de S en la planta es el mejor indicador de deficiencia de S y que valores críticos deberían ser utilizados (Blake-Kalff *et al.*, 2001). Según Pinkerton (1998), el contenido de S total en la biomasa de la planta fue uno de los indicadores más satisfactorios del estado nutricional del cultivo. Para este indicador, Reussi *et al.* (2012) determinaron una primera aproximación a la curva de dilución de éste nutriente en trigo.

Laboratorios comerciales de Australia utilizan la concentración total de S medida en la materia seca aérea de cultivos y pasturas para determinar valores críticos de S en tejidos (Bolland *et al.* 2003). Brennan y Bolland (2006) postulan que el análisis de tejidos es también una ayuda para determinar la probabilidad de deficiencia de S para producción de granos de canola, debido a que valores de análisis de tejidos de biomasa aérea durante etapas de crecimiento tempranas pueden indicar deficiencias de S.

## **1.1. OBJETIVOS**

El objetivo general de la presente investigación es determinar indicadores de diagnóstico del estado nutricional nitrogenado y azufrado del cultivo de colza durante su ciclo de desarrollo y, en base a ello, proponer manejos correctivos mediante fertilización.

Los objetivos específicos son: i) determinar la curva de dilución de N y S en función de la materia seca producida, ii) proponer un índice de diagnóstico del estado nutricional del cultivo al estadio de elongación, iii) evaluar su capacidad de pronóstico del rendimiento en grano y aceite y iv) proponer dosis de fertilización nitrogenada en base a la concentración de N y S en planta al estadio de elongación.

Todos los objetivos fueron desarrollados en dos artículos científicos en función de los requisitos de la revista *Agrociencia*. Pero únicamente el primer artículo, desarrollado en el capítulo número dos, fue presentado y aprobado para su publicación en el mes de enero del presente año.

## **2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO NUTRICIONAL DEL CULTIVO DE COLZA (*BRASSICA NAPUS*) EN BASE A CURVAS DE DILUCIÓN DE NITRÓGENO Y AZUFRE.**

### **2.1. RESUMEN**

Para la obtención de elevados rendimientos en el cultivo de colza es necesaria la complementación del Nitrógeno con adecuada nutrición de azufre. El objetivo del presente trabajo fue determinar indicadores de diagnóstico del estado nutricional del cultivo en referencia a nitrógeno y azufre en planta para la óptima producción de grano y aceite. Se obtuvieron las ecuaciones de dilución para la concentración crítica de nitrógeno y azufre ( $N_c = 5,21 \text{ MS}^{-0,36}$  y  $S_c = 1,22e^{-0,18\text{MS}}$  respectivamente). A partir de las ecuaciones, 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 la condición de azufre limitante la respuesta del rendimiento al estado nutricional nitrogenado fue lineal. Los resultados indican la necesidad de una cantidad mínima de S absorbida para alcanzar el rango de rendimiento máximo. La tasa de dilución del azufre crítico fue menor a la del nitrógeno por lo cual la relación Nt:St no resultó útil en predecir el estado nutricional del cultivo para el crecimiento y producción de grano pero sí lo hizo para la concentración de aceite con valor crítico de 7,7, pero el rendimiento fue más importante que la concentración de aceite en determinar la productividad de este elemento.

**Palabras clave:** requerimiento nutricional, relación N:S, canola, predicción, aceite.

### **2.2. SUMMARY**

For obtaining high yields in the rapeseed crop is needed supplemental Nitrogen with adequate sulfur nutrition. The aim of this study was to determine the diagnostic

indicators of nutritional status of the crop in reference to nitrogen and sulfur for optimal plant grain and oil production. Equations were obtained for sulfur and nitrogen dilution critical ( $N_c = 5.21 MS^{-0.36}$  and  $S_c = 1.22 e^{-0.18MS}$ , respectively). From the equations, the sulfur nutrition critical index was 0.88 and 0.74 for maximum biomass production in elongation and grain respectively, to nitrogen only found critical value of 1.04 for the production of biomass in elongation, for the production of grain was observed that under the condition of *sufficient sulfur* there was no nitrogen limiting plant across the nutritional status range studied and, in turn, under the condition of *limiting sulfur* yield response to nutritional status nitrogen was linear. The results indicate the need to a minimum amount of S absorbed to reach maximum yield range. The dilution rate was lower critical sulfur to nitrogen for which the Nt:St resulted not useful in predicting the nutritional status of crop growth and grain yield but did so for the oil concentration with critical value 7.7, but the yield was more important than the concentration of oil in determining the productivity of this element.

**Key words:** nutritional requirement, N:S, oilseed rape, prediction, oil.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

El cultivo de canola (*Brassica napus*) posee una elevada demanda de nitrógeno (N) y un mayor umbral de requerimiento que los demás cultivos extensivos (Colnenne *et al.*, 1998). Además, debido a la estrecha relación existente entre N y azufre (S) asociados al rol central en la producción de proteínas (Orlovius, 2003), es necesaria la complementación del N con adecuado suministro de azufre (Zamora y Massigoge, 2008). Por lo tanto, la obtención de altos rendimientos de grano depende de identificar el óptimo estado nutricional del cultivo referido a estos dos nutrientes. Para esto es necesario contar con herramientas de diagnóstico como lo es el análisis de nutrientes en planta, su interpretación mediante curvas de dilución (Colnenne *et al.*, 1998; Plank y Tucker, 2000) y la relación de concentración Ntotal:Stotal (Nt:St) en la biomasa como fuese propuesto por Reussi *et al.*, 2012 en cultivo de trigo.

Las curvas de dilución son definidas por los niveles de concentración crítica del nutriente en la biomasa aérea durante todo o parte del ciclo del cultivo (Colnenne

*et al.*, 1998). En nitrógeno, esta concentración crítica ha sido definida como la mínima concentración de N requerida para lograr la máxima tasa de crecimiento del cultivo (Greenwood, 2001), y varían con la biomasa aérea producida, ya que se produce un efecto de dilución del nitrógeno en la planta. Durante etapas tempranas de crecimiento el fenómeno de dilución del N es poco importante debido a la ausencia de competencia por luz entre plantas (Lemaire *et al.*, 1997). Existen reportes de esta dilución para varios cultivos, en canola invernal hasta valores de materia seca de 6,47 Mg ha<sup>-1</sup> (Colnenne *et al.*, 1998), en trigo hasta 14 Mg ha<sup>-1</sup> (Justes *et al.*, 1994), en maíz hasta 12,1 Mg ha<sup>-1</sup> (Plenet y Lemaire, 2000) y en girasol hasta floración (Merrien, 1992). Después de la floración, la relación alométrica entre concentración de N y peso seco aéreo cambia con la edad de la planta (pérdida de hojas e incremento de tejidos lignificados) y también con la naturaleza bioquímica de los compuestos almacenados en la semilla (Lemaire *et al.*, 1997). En este sentido, Arce de Caram *et al.* (2003) concluyeron que la curva de dilución del N en el cultivo de girasol, propuesta por Merrien (1992) no fue útil en juzgar el estado nitrogenado en estadios posteriores a floración. Colnenne *et al.* (1998) determinaron una curva de dilución de N en colza invernal válida para valores de acumulación de materia seca entre 1,43 y 6,47 Mg ha<sup>-1</sup>, representada por la siguiente ecuación:

$$\%N_c = 4,48W^{-0,25}$$

Donde W es la cantidad de materia seca aérea total acumulada en un momento expresada en Mg ha<sup>-1</sup>.

Valores de concentración de N más elevados ( $\%N_c = 5,7W^{-0,5}$ ) a lo reportado anteriormente fueron obtenidos por Greenwood *et al.* (1990) para un grupo de especies C<sub>3</sub>. Según Justes *et al.* (1994) estos últimos autores han seleccionado situaciones en las cuales el N no fue limitante para el crecimiento, por lo tanto, ese mayor valor se puede deber a una sobreestimación de la concentración de nitrógeno. Varios autores han reportado diferentes niveles de concentración crítica de N en canola para iguales momentos fenológicos específicos del ciclo (Plank y Tucker, 2000; Hocking *et al.*, 1997; Orlovius, 2003), estos valores difieren entre ellos y son específicos de cada trabajo dejando en evidencia la variación del nivel crítico cuando

no se tiene en cuenta la producción de materia seca acumulada al mismo momento que se determinó la concentración de N.

Andrade *et al.* (1996) sostienen que estas curvas pueden llegar a ser únicas para diferentes genotipos de una especie y hasta para un grupo de especies, y serían válidas para diferentes ambientes en condiciones de buena disponibilidad de agua. Sin embargo se ha reportado variación en la curva crítica de N entre y dentro de especies (Justes *et al.*, 1994) y entre sitios experimentales (Greenwood *et al.*, 1990).

Según Gastal y Lemaire (2002), la concentración de N crítico no es un objetivo en sí mismo a seguir durante el crecimiento del cultivo, sino que es una referencia fundamental en cualquier etapa de crecimiento, que permite determinar si la nutrición nitrogenada de los cultivos es óptima o subóptima con respecto a la tasa de crecimiento del cultivo. En este sentido, las curvas de concentración crítica de nutrientes separan situaciones en las que la concentración del nitrógeno es limitante para la producción de biomasa del cultivo, de situaciones en las que se encuentra en exceso, y no logran ningún incremento adicional en la producción de biomasa del cultivo. Para una situación dada y en cualquier momento del período de crecimiento del cultivo, es posible determinar un Índice de Nutrición Nitrogenada (INN) como la relación entre la concentración actual de N y la concentración crítica de N, correspondiente a la masa real del cultivo (Lemaire *et al.*, 2008). Los valores de INN próximos a 1 indican que en la fecha de la determinación del % N actual el cultivo está en situación de suministro de N no limitante. Valores mayores a 1 indican un consumo de lujo de N y valores inferiores indican deficiencia de N. La intensidad de esta deficiencia se puede estimar por el valor del INN (Lemaire *et al.*, 2008). Si bien este índice en su origen es un indicador de estado nutricional del cultivo para el momento en el cual es determinada la biomasa acumulada y su concentración de N, Lemaire *et al.* (2008), han encontrado que los cambios en INN durante el período vegetativo del cultivo, en el cual se genera el potencial productivo, tiene un gran efecto sobre el número de granos, y por lo tanto sobre el rendimiento.

Para N existe abundante información en la literatura científica sobre la nutrición de este nutriente para vegetales en general y también específica para el cultivo de colza (Ozer, 2003; Malagoli *et al.*, 2005; Colnenne *et al.*, 1998; Rathke y

Schuster, 2001), incluso una curva de dilución del nutriente antes mencionada, herramienta fundamental en cualquier diagnóstico nutricional. Pero también es sabido que para obtener producción más elevada y estable del cultivo de colza es necesaria que la nutrición nitrogenada sea acompañada con un contenido de S adecuado, el cual también mejoraría el índice de eficiencia del N (Hřivna *et al.*, 2004; Zamora y Massigoge, 2008). La disponibilidad de N también estaría afectando la movilidad del S desde diferentes compartimentos de la planta, lo que provee que cambios en constituyentes ricos y pobres en S en el ciclo de progreso del cultivo sean probablemente más complejos que para N (Reussi *et al.*, 2012). Este mismo autor generó una primera aproximación a la curva de dilución del S en trigo utilizando un modelo de regresión potencial entre la producción de biomasa aérea y la concentración total de azufre crítico ( $Sc$ ) representado por la ecuación:  $Sc = 0,37W^{0,169}$ , herramienta ésta no disponible para el cultivo de colza. Comparando esta curva con la del N propuesta por Justes *et al.* (1994) para el mismo cultivo, Reussi *et al.* (2012) observó una menor tasa de dilución del  $Sc$  con respecto al  $Nc$  en el ciclo del cultivo ( $b = -0,169$  y  $-0,442$  para S y N respectivamente). Según este autor esto genera una relación  $Nt:St$  inestable durante el ciclo del cultivo, característica no deseable en un indicador de diagnóstico perfecto. Igualmente esta relación es ampliamente estudiada y utilizada para diagnosticar las deficiencias de S en vegetales (Dijkshoorn *et al.*, 1960; Dijkshoorn y Van Wijk, 1967; Pinkerton, 1998), aunque según Pinkerton (1998) el indicador de estado azufrado en el cultivo de colza más satisfactorio es la concentración de  $St$ . Según Dijkshoorn *et al.* (1960), azufre y nitrógeno se utilizan en el crecimiento de acuerdo con una relación estequiométrica definida, la cual va estrechamente de acuerdo con la composición elemental de los principales consumidores de estos elementos, la sustancia proteica. La síntesis de proteínas puede estar limitada por la escasez de aminoácidos sulfurados en los tejidos, pero la conversión de nitrato y amonio en N orgánico puede continuar y el cese de las síntesis de proteínas, hace que los aminoácidos libres se acumulen en los tejidos. Además, en la mayoría de las especies investigadas, el S orgánico se presenta principalmente como cisteína y metionina, pero en la especie Brassica, existen otras formas de S orgánico que determinan una relación Norgánico/Sorgánico más baja

(Dijkshoorn y Van Wijk, 1967). Asimismo, en condiciones de alta disponibilidad de N se fomenta la absorción de S, por lo tanto hay una menor dilución de este nutriente (Reussi *et al.*, 2012). En colza, Pinkerton (1998) ha analizado la relación Nt/St bajo suministro constante de S en condiciones de invernadero, obteniendo valores críticos para producción de biomasa desde 13,5 a los 57 días post siembra a 9,2 en los 93 días post siembra. Valores de esta relación inferior a 7,7 pueden ser inferidos a partir de los valores críticos de N y S (3,6 % y 0,47 % respectivamente) previos a floración reportados por Plank y Tucker (2000). Además, si se consideran los rangos de suficiencia reportados por estos mismos autores (para N entre 4,0 y 6,4 % y para S entre 0,65 y 0,90 %) para el mismo momento antedicho, el rango de variación de Nt/St inferido es de 4,4 a 9,8.

Brennan y Bolland (2006) reportaron que la respuesta de la producción de biomasa y grano a la aplicación de fertilizante azufrado ocurrió para valores de concentración de S en tejido menores a 0,4 %, en torno a la semana 4 a 6 después de la siembra. Resultados inferiores, pero en etapa más avanzada de crecimiento del cultivo, han sido obtenidos por Pinkerton (1998). Este autor obtuvo concentraciones críticas de St en planta, tanto para diagnóstico como para la predicción, entre 0,20-0,25% en o antes de la floración, cuando la oferta de S en el suelo fue estable.

La importancia del S en el cultivo, también afecta la concentración de aceite en grano, en este sentido, datos reportados por Hocking *et al.* (1996) demuestran reducciones de hasta 21 % en la concentración de aceite en parcelas sin aplicación de S en comparación a plantas con aplicación de 40 Kg S ha<sup>-1</sup>. Este mismo autor también obtuvo valores óptimos de referencia para la relación de concentración de Nt:St, en plantas deficientes en S fue mayor que 10, y 7,5 para plantas con adecuado suministro de S, evaluadas por la concentración crítica de S en semilla propuesta por este autor. Resultados similares fueron obtenidos por otros autores (Brennan y Bolland, 2008; Malhi *et al.*, 2007), en los cuales la concentración de aceite en el grano aumentó a medida que se aplicó más S, sobre todo cuando se aplicaron las mayores tasas de N.

Se plantea como hipótesis que el valor crítico de la concentración de N para una cantidad de materia seca producida hasta C1 puede utilizarse como diagnóstico

del estado nutricional del cultivo, y junto a la concentración de S, como predictor del rendimiento en grano y de la posible respuesta a la fertilización con N. Los objetivos específicos del presente trabajo son: i) determinar la curva de dilución de N y S en función de la materia seca producida; ii) proponer un índice de diagnóstico del estado nutricional del cultivo al estadio C1 y iii) evaluar su capacidad de pronóstico del rendimiento en grano y aceite

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron seis experimentos en chacras comerciales del litoral oeste de Uruguay y dos experimentos en condiciones controladas en invernadero en la estación experimental Dr. Mario A. Casinonni (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, departamento de Paysandú, República Oriental del Uruguay (32° 23'S; 58° 03'W). Los cultivares utilizados fueron de colza tipo primaverales e invernales (Tabla 1). El diseño experimental utilizado fue factorial incompleto con tres repeticiones en todos los casos.

Tabla 1: Características de los ensayos realizados.

Sitio	Fecha de siembra	Tipo de colza	Variedad	Etapa de fertilización	Etapa de muestreo (CETIOM, 2012)
El Puntal	05/05/2010	Primaveral	Rivette	S-B5-C1	B5-C1
La Esperanza	08/06/2010	Primaveral	SW 2797	B2-C1	C1
Palmar 1	15/07/2011	Primaveral	Hyola 61	B2-C1-D1	C1-D1
Palmar 2	15/07/2011	Primaveral	Rivette	B2-C1	C1-D1
Invernadero 1*	20/06/2011	Primaveral	Rivette/ Hyola 71	S-B2-B5-C1- D1-F1-G2	B5-C1-D1-F1- G2
Invernadero 2*	20/07/2011	Primaveral	Rivette	S-B2-B5-C1- D1-F1-G2	B5-C1-D1-F1- G2
Villa Maruca 1	25/04/2011	Invernal	Pulsar	B2-B7-C1	B7-C1
Villa Maruca 2	25/04/2011	Invernal	Pulsar	B5-C1	C1

\*: Ensayos sembrados en macetas bajo invernadero. S: siembra, B2: dos hojas verdaderas desplegadas, B5: cinco hojas verdaderas desplegadas, B7: siete hojas verdaderas desplegadas, C1: comienzo de elongación del tallo, aumento de la vegetación y aparición de hojas jóvenes, D1: yemas unidas cubiertas por hojas terminales, F1: primeras flores abiertas y G2: las 10 primeras silicuas tienen una longitud de entre dos y cuatro cm.

#### **2.4.1. Ensayos a campo**

Los tratamientos fueron la combinación de cuatro dosis de nitrógeno (N) (0, 30, 60 y 90 Kg ha<sup>-1</sup>) aplicadas en momentos específicos del ciclo del cultivo (Tabla 1). Del total de las combinaciones posibles se seleccionaron aquellas que: i) permitieran generar diversidad de crecimiento y concentración de N en las plantas, ii) la secuencia de aplicaciones de N tuviera sentido agronómico, iii) la dosis de N agregada a la siembra no superara los 60 Kg ha<sup>-1</sup> y la dosis total agregada durante el ciclo no fuera mayor a 220 Kg ha<sup>-1</sup> de N. La disponibilidad de fósforo y potasio en el suelo fueron corregidos a la siembra con el agregado de 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y 60 kg KCl ha<sup>-1</sup> respectivamente.

#### **2.4.2. Ensayos en macetas**

Se instalaron dos ensayos en macetas, diferentes en fecha de siembra (ver Tabla 1), ambos bajo invernadero, que se mantuvieron hasta que las plantas alcanzaron la forma de roseta (Estadio B5-B6 según Escala CETIOM, 2012), momento en el cual se trasladaron las macetas al exterior del invernadero, condiciones de campo. La mezcla de suelo elaborada con el objetivo de reducir la disponibilidad de N en el suelo fue mitad suelo y mitad arena, resultando en textura franco-arenosa y 1,23 % de carbono orgánico.

Al momento de la siembra, se agregó en la mezcla del suelo fertilizante químico conteniendo fósforo, potasio y azufre en cantidades equivalentes a 60, 77 y 40 Kg ha<sup>-1</sup> respectivamente.

En cada momento de fertilización (Tabla 1) se realizó en cada maceta el agregado de N en formulación granulada a dosis de 0, 25 y 60 Kg N ha<sup>-1</sup>, posterior riego manual.

El suministro de agua bajo invernadero se realizó en forma manual, asegurando la disponibilidad de agua constante en el suelo. Luego de trasladadas las macetas a condiciones de campo el suministro se mantuvo constante mediante la inmersión de estas en bandejas con 3 cm de lámina de agua hasta el final del período experimental.

### **2.4.3. Determinaciones**

En cada sitio experimental fue determinado el nivel de N, fósforo, potasio y materia orgánica del suelo al momento de la siembra y además la familia textural (datos presentados en apéndices). En cada estadio de crecimiento mencionado en la Tabla 1, se realizó muestreo de biomasa mediante el corte de plantas en dos metros lineales para la determinación de materia seca aérea y su concentración de Nt y St. La cosecha de los experimentos se realizó mediante el corte manual de plantas en dos metros lineales en cada parcela, posterior embolsado y secado a temperatura ambiente hasta que las silicuas alcancen su punto de máxima dehiscencia natural para así efectuar la trilla manualmente. Se determinó la cantidad de grano obtenida, su humedad y peso de mil granos. Para determinar el estado fenológico del cultivo se utilizó la escala de CETIOM (2012).

Los valores de las variables climáticas (temperatura y precipitaciones) fueron solicitadas a la Dirección Nacional de Meteorología para la localidad más cercana a cada sitio experimental (datos presentados en apéndices).

### **2.4.4. Análisis del contenido de Nt, St y aceite**

Las determinaciones químicas de St y aceite en grano fueron realizadas en el laboratorio del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria y el Nt en la estación experimental M. A. Casinonni de Facultad de Agronomía. La determinación del St se realizó mediante combustión a 1350°C y posterior detección de SO<sub>2</sub> por infrarrojo con un analizador elemental (Leco<sup>®</sup>, modelo Truspec CNS, St. Joseph, MI, USA), para la concentración de Nt se utilizó la metodología Kjeldahl. El contenido de aceite en grano fue determinado con un espectrómetro de resonancia magnética nuclear (Oxford 4000 NMR, Oxford Analytical Instruments Ltd., Abingdon, United Kingdom)

### **2.4.5. Análisis de datos**

Dada la variación en la densidad de plantas dentro de los experimentos ubicados en chacras comerciales, se procedió a eliminar su posible efecto mediante la inclusión en el análisis de varianza del número de plantas por superficie en cada parcela como covariable, utilizando los predichos de este modelo para obtener los

valores de las variables de interés sin el efecto de la densidad poblacional. Los rendimientos se presentan en términos relativos al máximo de cada ensayo para evitar el ruido del efecto sitio y tipo de colza. En el caso de los análisis para diagnóstico del estado nutricional del cultivo se utilizaron solamente los resultados de parcelas sin agregado de N en C1. En estos casos, el rendimiento máximo del ensayo se le asigna a la parcela que obtuvo la máxima producción sin agregado de fertilizante nitrogenado.

*Curva de Dilución de Nt y St:* Para establecer los niveles críticos de Nt y St en cada estado fenológico se utilizó la metodología propuesta por Justes *et al.* (1994), realizándose el análisis de la varianza de la cantidad de biomasa seca aérea producida en cada fecha de medición y sitio experimental, efectuándose así mismo la comparación de medias de tratamientos con el test de mínima diferencia significativa de Fisher, estableciendo un nivel de significancia de 5% a priori, con el software estadístico Infostat/e. La concentración de Nt y St establecida como el nivel crítico para un estadio determinado corresponde a la concentración cuantificada en el tratamiento que logró una producción de biomasa por encima de la cual no existió un nuevo incremento significativo ( $p \leq 0,05$ ). Posteriormente, cada uno de estos datos fue utilizado para definir la curva de dilución del Nt y St en función de la biomasa seca producida mediante ecuaciones de regresión. Para el caso del S se ajustaron dos funciones de regresión porque la de mejor ajuste por cuadrado medio del error no era útil en comparar la tasa de dilución del Sc con la del Nc.

*Índices de Nutrición (IN):* Se utilizó la metodología propuesta por (Lemaire y Meynard, 1997) para trigo que relaciona la concentración actual con el nivel crítico para el estadio de referencia.

Para nitrógeno, este índice es determinado por la siguiente ecuación:

$$INN = N_{act}/N_c$$

Donde el  $N_{act}$  corresponde a la concentración de N determinada en la biomasa y  $N_c$  al N crítico estimado a partir de la ecuación de dilución.

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

$$Dónde: INS = S_{act}/S_c$$

Cuando éste índice tiene valores menores a uno indica que la concentración en planta entera es deficiente; es óptimo cuando su valor es igual a uno y supra óptimo cuando es mayor a uno.

#### **2.4.5.1. Evaluación de las curvas de dilución y los índices de nutrición**

El INN e INS fueron utilizados para confirmar la utilidad de las curvas de dilución en predecir el nivel crítico del nutriente necesario para producir la máxima cantidad de biomasa seca en un momento determinado, llámese capacidad de diagnóstico del estado nutricional del cultivo a un determinado momento. Para esto se utilizó un modelo de regresión no lineal con plateau, tomando los rendimientos relativos de materia seca acumulada a elongación (C1) como variable dependiente y los IN, en el mismo estado fenológico, como regresoras. En segunda instancia, para el estadio C1, fueron evaluados por su capacidad de pronóstico del rendimiento en grano, relacionándolos con el rendimiento relativo de grano obtenido en los tratamientos que no recibieron el agregado de nitrógeno posterior. En este análisis de regresión se utilizó una variable auxiliar dummy para contemplar el efecto del estado azufrado y su posible interacción con el INN en C1, obteniendo así la respuesta del rendimiento al INN en condición de *azufre limitante* y *azufre suficiente* al momento C1. La condición azufrada fue determinada utilizando el nivel de suficiencia del INS en C1 para lograr el 95 % del rendimiento máximo. A las parcelas que presentaron valores de INS en C1 menores al crítico propuesto para este estadio, se les asignó la condición *azufre limitante* y a las que tuvieron valor igual o superior al crítico, *azufre suficiente*.

En las regresiones planteadas entre los índices de nutrición con los rendimientos relativos de materia seca o rendimiento, se utilizaron los datos originales sin promediar, ya que esto resultó en menor valor de cuadrado medio del error, que al utilizar los datos promedios por tratamiento. Este mismo criterio se mantuvo para el análisis de regresión entre el S absorbido y el INN en C1, pero aquí solamente se utilizaron los datos clasificados en condición de *azufre limitante*.

#### **2.4.6. Aceite en grano**

Se analizó la concentración en respuesta a los índices de nutrición y relación azufre-nitrógeno mediante la metodología propuesta por Cate y Nelson (1971) y la producción de aceite.ha<sup>-1</sup> en respuesta al rendimiento por medio de regresión simple.

### **2.5. RESULTADOS**

#### **2.5.1. Curvas de dilución de nitrógeno y azufre crítico**

Con los 8 experimentos y estadios fenológicos de muestreo comprendidos entre B7 y G2 de la Escala CETIOM, se lograron 15 combinaciones de materia seca producida y su concentración crítica de Nt y St (Tabla 2).

Tabla 2: Niveles críticos para la concentración de nitrógeno total (Nt) y azufre total (St) determinados en cada sitio y estadio fenológico de muestreo según la metodología propuesta por Justes *et al.* (1994).

Sitio	Etapa de Muestreo (CETIOM, 2012)	Materia Seca (Mg ha <sup>-1</sup> )	Concentración en biomasa	
			Nt (%)	St (%)
Invernadero 1	C1	0,55	6,4	1,3
Invernadero 2	D1	0,62	6	1
Palmar 1	C1	0,88	5,7	1,1
Palmar 2	C1	1	5,4	0,9
El Puntal	C1	1,08	5,3	0,8
La Esperanza	C1	1,36	4,4	0,9
Invernadero 1	D1	1,52	4,1	1,1
Villa Maruca 1	B7	1,93	4,8	0,8
Invernadero 2	F1	2,41	4,1	1
Invernadero 1	F1	2,83	2,7	0,8
Invernadero 2	G2	3,11	3,3	0,7
Palmar 1	D1	3,12	4	0,7
Palmar 2	D1	3,41	3,4	0,6
Villa Maruca 1	C1	4,64	3,1	0,5
Villa Maruca 2	C1	5,97	2,6	0,4

B7: siete hojas verdaderas desplegadas, C1: comienzo de elongación del tallo, aumento de la vegetación y aparición de hojas jóvenes, D1: yemas unidas cubiertas

por hojas terminales, F1: primeras flores abiertas y G2: las 10 primeras silicuas tienen una longitud de entre dos y cuatro cm.

El rango de variación en biomasa estuvo entre 0,55 y 5,97 Mg ha<sup>-1</sup> 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.

La curva de dilución del nitrógeno total crítico (Figura 1a) resultó del ajuste de un modelo de regresión potencial (Ecuación 1), mientras que para la curva de dilución del azufre total crítico, el mejor ajuste estadístico resultó de un modelo de regresión exponencial (Ecuación 2, Figura 1b). Dada esta diferencia entre funciones de regresión, los datos del Sc también se ajustaron a un modelo de regresión potencial (Ecuación 3) solo a los efectos de comparar la tasa de dilución de ambos nutrientes (Curva de dilución no mostrada). Los modelos de regresión relacionaron la concentración crítica teórica de cada nutriente con la materia seca producida según las siguientes ecuaciones:

$$[1] N_c = 5,21 MS^{-0,36} (R^2 = 0,87, p < 0,0001)$$

$$[2] S_c = 1,22 e^{-0,18 MS} (R^2 = 0,82, p < 0,0001, CME = 0,01)$$

$$[3] S_c = 0,99 MS^{-0,32} (R^2 = 0,74, p < 0,0001, CME = 0,02)$$

Donde N<sub>c</sub> es la concentración de N crítica en la materia seca expresada en %, S<sub>c</sub> es la concentración de S crítica en la materia seca expresada en %, MS es la cantidad de materia seca producida expresada en Mg ha<sup>-1</sup> y CME es el cuadrado medio del error de ajuste

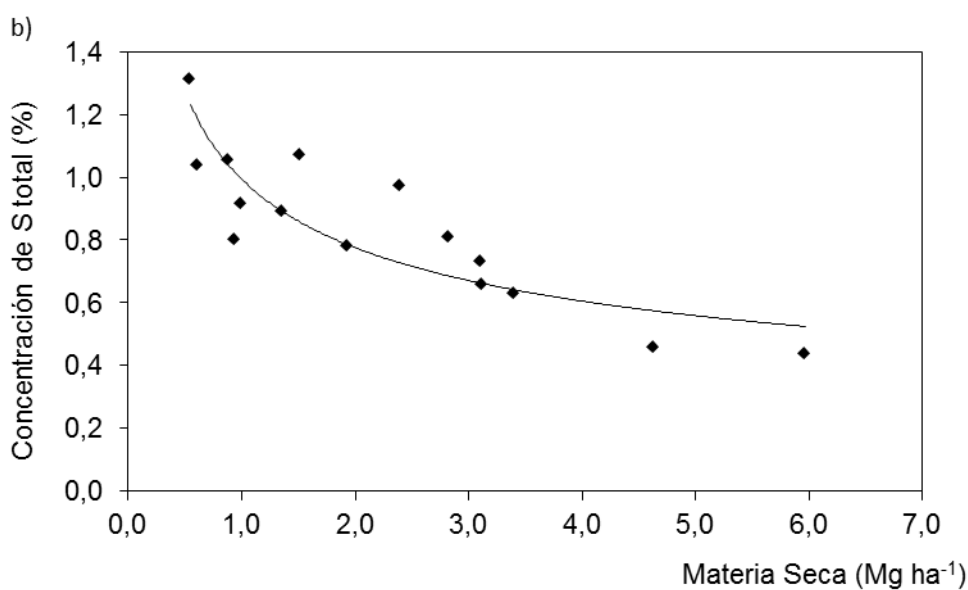
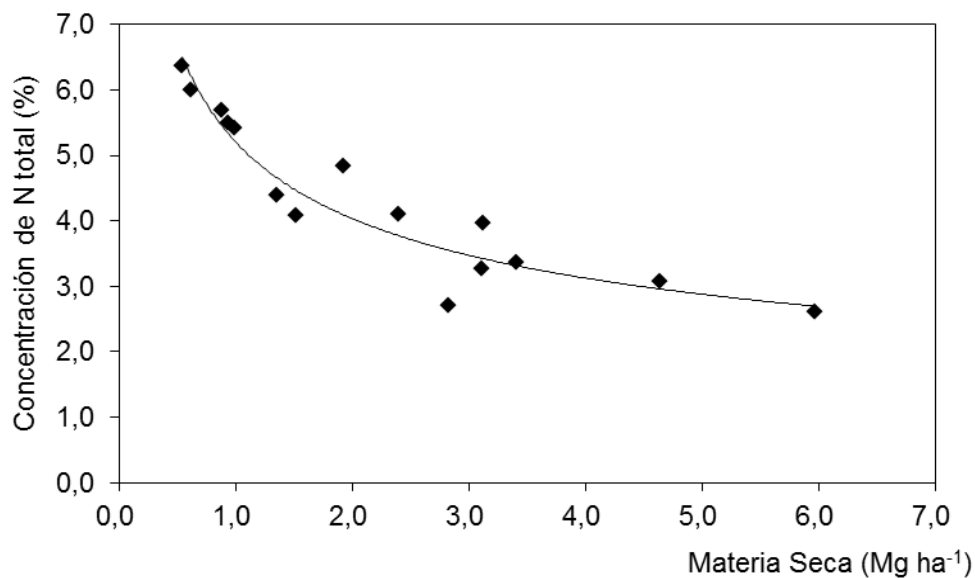


Figura 1: Curva de dilución de la concentración crítica de nitrógeno total en planta (a) y de la concentración crítica de azufre total en planta (b), determinadas por la metodología propuesta por Justes *et al.* (1994).

### **2.5.2. Índices de estado nutricional**

Los índices de estado nutricional relacionan los niveles críticos determinados con las ecuaciones de dilución para la producción acumulada de materia seca, con la concentración de nitrógeno y azufre observada. El INN en C1 necesario para obtener

el 90 % del rendimiento máximo de materia seca en elongación fue 1,04 y el INS de 0,88 (Figura 2a y 2b respectivamente).

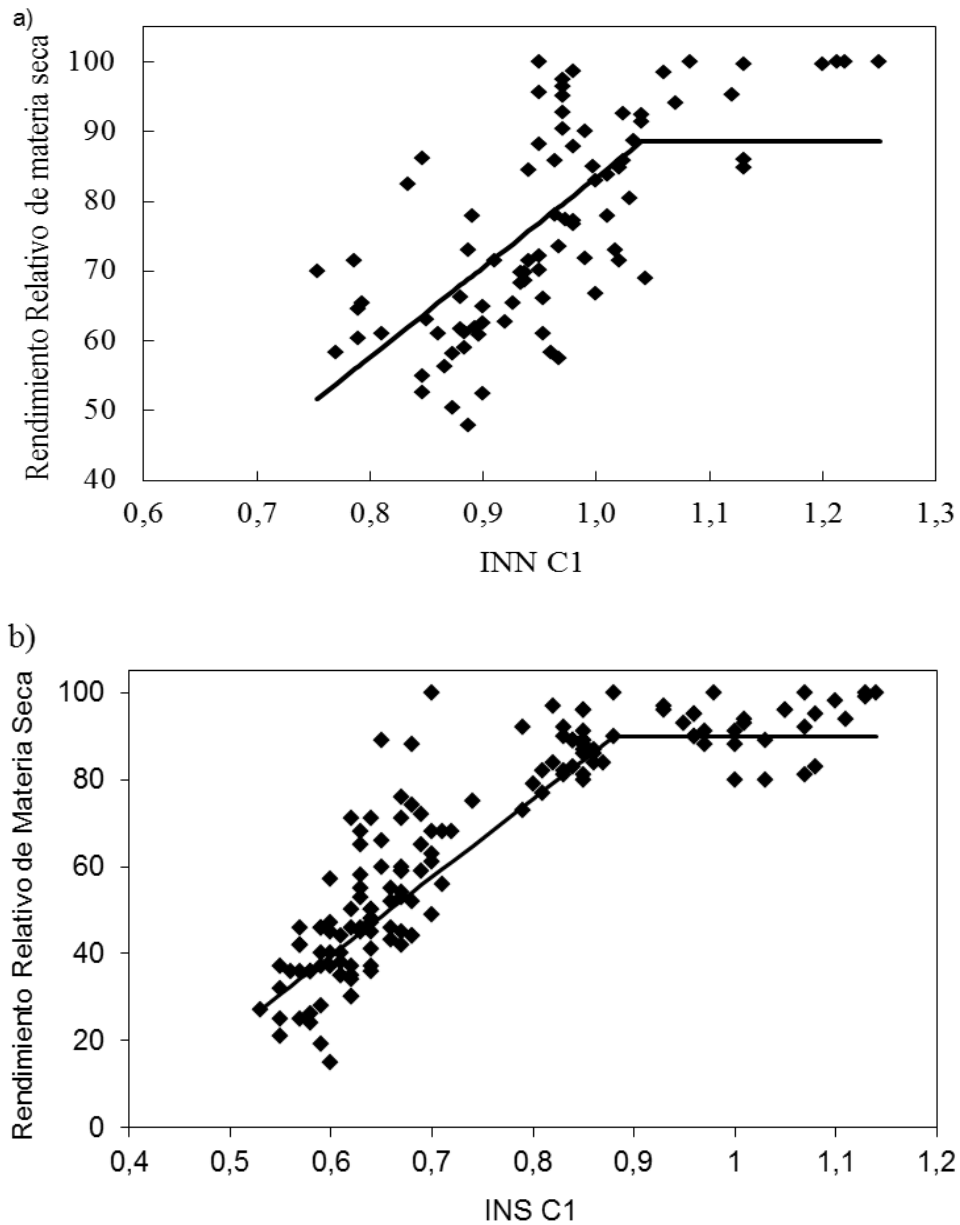


Figura 2: Nivel crítico del INN (a) y del INS en C1 (b) para el rendimiento relativo de materia seca acumulada a elongación. Las líneas negras en figura a y b representan el ajuste del modelo de regresión no lineal con plateau utilizado para determinar el nivel crítico de INN y de INS en C1 respectivamente para obtener el 90 % de materia seca.

Por debajo de estos valores existió incremento lineal en la producción de materia seca en respuesta a la mejora en ambos índices.

Las ecuaciones de regresión obtenidas en el análisis de los datos mostrados en las figuras anteriores son las siguientes:

Figura 2a:

$$\text{Fase lineal: } \text{INN} < 1,04 \rightarrow \text{RR (\%)} = -45,3 + 128,8 \cdot \text{INN}$$

$$\text{Fase Plateau: } \text{INN} \geq 1,04 \rightarrow \text{RR (\%)} = 90$$

Figura 2b:

$$\text{Fase lineal: } \text{INS} < 0,88 \rightarrow \text{RR (\%)} = -68,4 + 180 \cdot \text{INS}$$

$$\text{Fase Plateau: } \text{INS} \geq 0,88 \rightarrow \text{RR (\%)} = 90$$

### **2.5.3. Capacidad de pronóstico de los indicadores de estado nutricional**

Considerando el conjunto de datos, el INN en C1 se relacionó de manera lineal ( $p < 0,0001$ ) con el rendimiento de grano, pero sin alcanzarse un nivel de suficiencia en el rango estudiado (Figura no mostrada). En tanto, el nivel de suficiencia del INS para el rendimiento de grano tuvo un valor crítico de 0,74, un 16 % menor al valor de suficiencia para la producción de biomasa en C1. Cuando se incluyó como una *variable dummy* el estado azufrado del cultivo en C1 (Figura 3b), definido en base al nivel crítico determinado (Figura 3a), no existió relación significativa entre el INN y el rendimiento de grano para la condición de *azufre suficiente* ( $p = 0,72$ ). En cambio, se mantuvo la relación lineal positiva significativa ( $p < 0,0001$ ) para las situaciones definidas como *azufre limitante*, (Figura 3b). El análisis de regresión incluyendo la *variable dummy* mostró una interacción significativa, por lo que ambas situaciones se diferenciaron estadísticamente entre sí ( $p < 0,0001$ ).

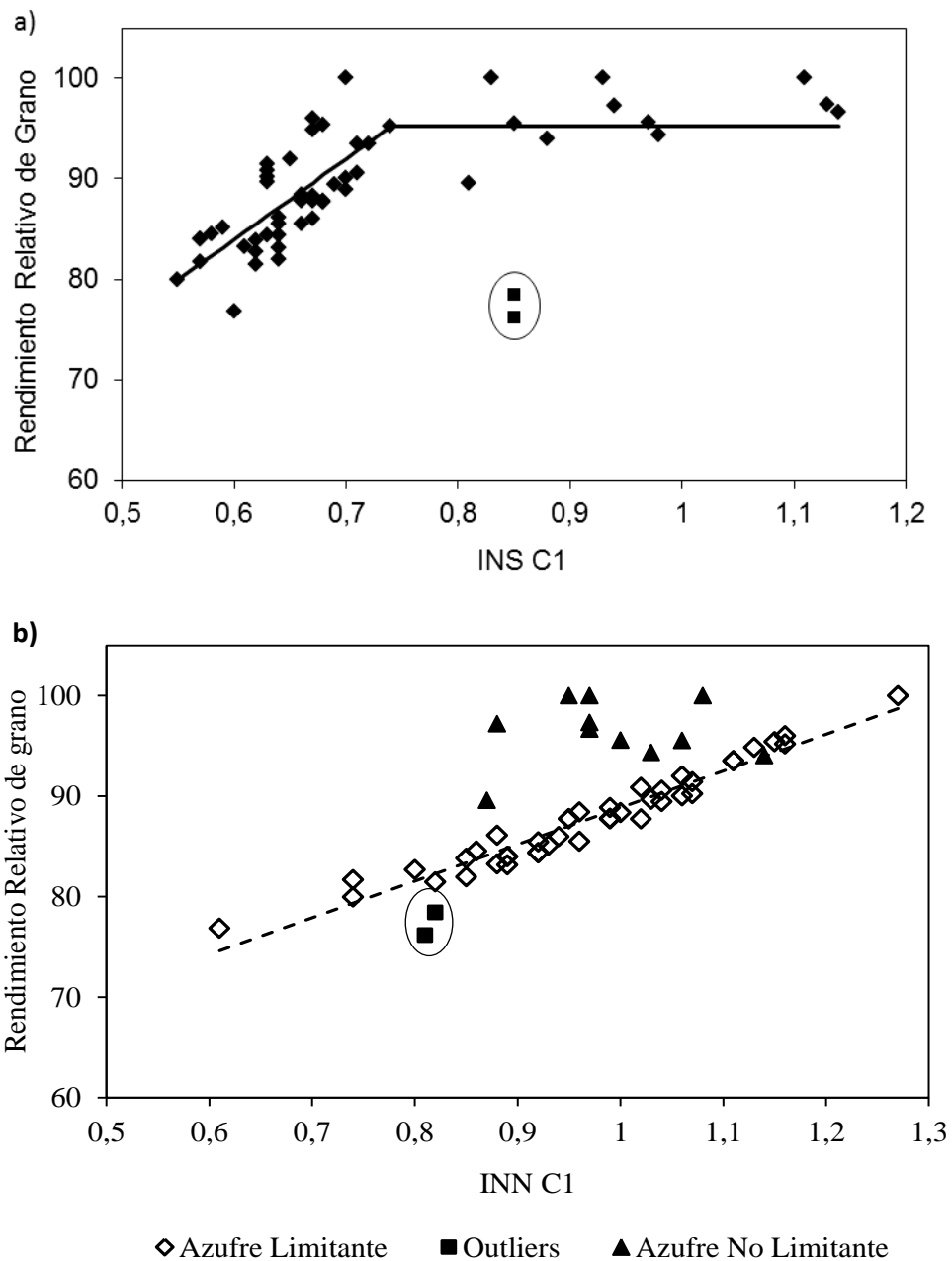


Figura 3: a) Nivel crítico del INS en C1 para el rendimiento relativo de grano. La línea continua representa el ajuste del modelo de regresión no lineal con plateau utilizado para determinar el nivel crítico de INS para obtener el 95 % de la producción máxima de grano. b) Rendimiento relativo de grano en función del INN en C1 para condición de azufre *limitante* y *suficiente*.

Las ecuaciones de regresión obtenidas en el análisis de los datos mostrados en las figuras anteriores son las siguientes:

Figura 3a:

Fase lineal:  $INS < 0,74 \rightarrow RR (\%) = 35,8 + 80,2*INS$

Fase Plateau:  $INS \geq 0,74 \rightarrow RR (\%) = 95$

Figura 3b:

Azufre Limitante:  $RR (\%) = 52,43 + 36,41*INN$

En la condición definida como *azufre limitante*, si bien se logró alcanzar el rango de rendimientos máximos, el INN en C1 necesario fue mayor a 1, sugiriendo la necesidad de un consumo de lujo. Bajo esta misma condición *azufrada*, existió una relación lineal significativa ( $p < 0,0001$ ) entre el INN en C1 y la cantidad de St absorbida hasta C1 (Figura 4). Por tanto, la absorción de Nt y St estuvieron relacionadas y, en condiciones de consumo de lujo de Nt en C1, la cantidad de St absorbida se incrementó, mejorando el estado nutricional de la planta.

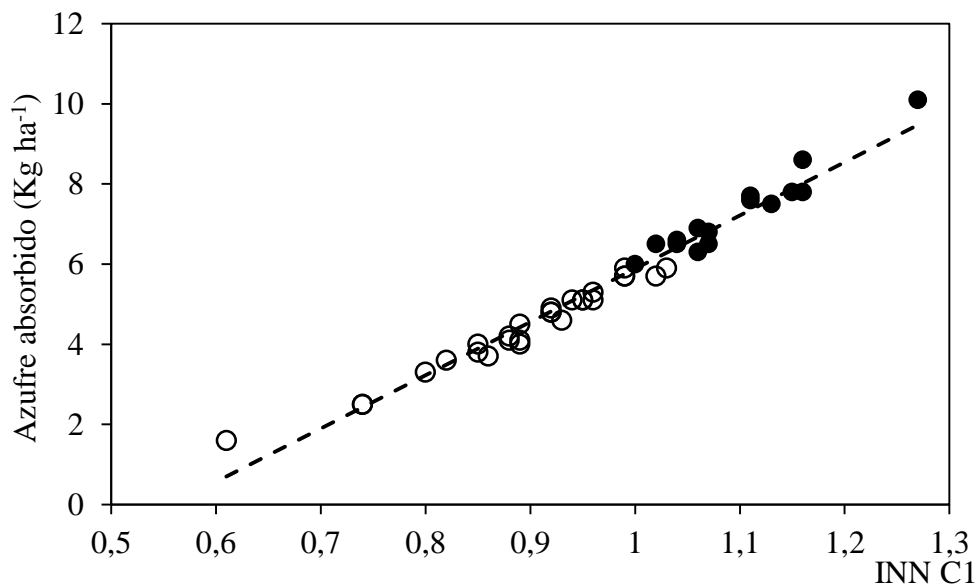


Figura 4: Contenido de azufre absorbido por el cultivo en relación al índice de nutrición nitrogenada, al estadio de elongación, bajo situación de azufre limitante. INN C1: Índice de Nutrición Nitrogenada al estadio de elongación. Los puntos negros corresponden a las parcelas que diagnosticadas en condición de azufre limitante según INS presentan cantidad de azufre absorbido a C1 mayor a 6 Kg ha<sup>-1</sup>.

#### **2.5.4. Concentración de aceite en grano**

La concentración de aceite en grano presentó un coeficiente de variación muy bajo (desde 1,4 a 4 %), por lo que la concentración relativa de aceite en grano varió solamente entre 86 y 100 %.

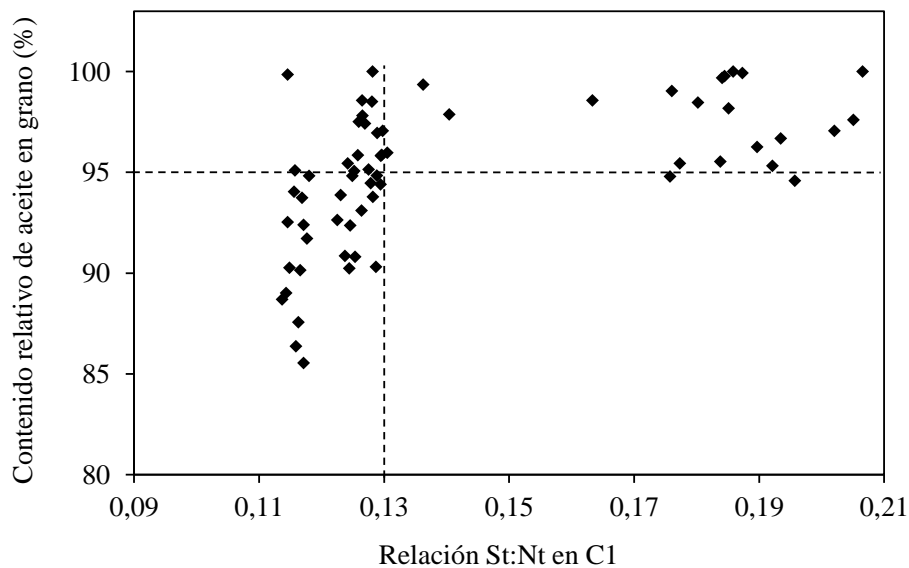


Figura 5: Contenido relativo de aceite en grano en función de la relación entre concentración de azufre total y nitrógeno total en planta al momento de elongación. St:Nt: relación entre la concentración de azufre total y nitrógeno total en la biomasa, C1: estado fenológico de elongación.

No se encontró un valor crítico para lograr la máxima concentración de aceite en grano para ninguno de los índices por sí solos. Sin embargo, la relación entre estos dos nutrientes (S:N) en C1 se relacionó con la concentración de aceite en grano (figura 5). El nivel crítico de S:N en C1 necesario para obtener el 95 % de la máxima concentración de aceite en grano fue de 0,13, lo que equivale a una relación Nt:St crítica de 7,7. Si bien éste es un indicador de fácil estimación, solamente da una idea relativa del estado nutricional entre ambas variables, pero una misma relación puede estar dada por valores diferentes de cada nutriente. Sin embargo, para este trabajo, el aumento en contenido de azufre, estimado mediante el INS, fue el componente principal en determinar la relación S:N debido a que todos los tratamientos con valor

de relación igual o por debajo de 0,13, presentaron INS en C1 menor a 0,84. Por otra parte, el 86 % de los tratamientos con relación S:N mayor o igual a 0,15 presentaron valores de INS en C1 igual o mayor a 0,93. En términos absolutos la producción de aceite por unidad de superficie estuvo afectada directamente ( $p < 0,0001$ ,  $R^2 = 0,97$ ) por el rendimiento.

## 2.6. DISCUSIÓN

La concentración de Nt y St en la biomasa total de la planta se redujo con el progreso del ciclo del cultivo, como es reportado para N en colza invernal (Colnenne *et al.*, 1998), maíz (Plenet y Lemaire, 2000), trigo (Justes *et al.*, 1994), girasol (Merrien, 1992) y para S en trigo (Reussi *et al.*, 2012). El modelo matemático que representó esta dilución para nitrógeno fue el mismo que reportado por Colnenne *et al.* (1998) a diferencia de lo sucedido para azufre con respecto al modelo propuesto por Reussi *et al.* (2012) para trigo. Si bien el fenómeno de dilución del Nc en la biomasa del cultivo de colza fue reconocible, los parámetros estimados difieren de los obtenidos por Colnenne *et al.* (1998). Los valores obtenidos por éste autor para los parámetros a y b de la ecuación de dilución fueron de 4,48 y - 0,25 respectivamente vs. 5,21 y - 0,36 respectivamente en el presente trabajo. Esta diferencia implica una mayor concentración de Nc en estadios tempranos del cultivo pero también una mayor dilución del mismo con el avance del ciclo del cultivo. Al igual que los resultados obtenidos por Justes *et al.* (1994) los coeficientes para la ecuación de dilución del Nc son inferiores a los propuestos por Greenwood *et al.* (1990) para especies C3. Estas diferencias para una misma especie, como lo discuten Greenwood *et al.* (1990) y Justes *et al.* (1994), pueden explicarse por diferencias en las condiciones pedoclimáticas en las que se obtienen los resultados.

La tasa de dilución del Sc, resultante de la ecuación de regresión potencial, resultó menor a la del Nc durante el ciclo del cultivo estudiado ( $b = -0,18$  y  $-0,36$  para S y N 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 Nc/Sc variable entre 3,3 y 6,9, sin un patrón de comportamiento en relación a la acumulación de biomasa del cultivo, y menores a los valores de 9,2 a 13,5

reportados por Pinkerton (1998), este aspecto condiciona el uso de esta relación como indicador de diagnóstico al igual que lo sucedido en trigo según Reussi *et al.*, (2012).

El INN e INS, calculados a partir de la concentración de Nt y St en planta y la materia seca producida hasta C1 pueden ser indicadores útiles para diagnosticar el estado nutricional del cultivo, momento en el cual es adecuado tomar acciones para su corrección mediante el agregado de fertilizante al suelo con el objetivo de alcanzar máximos rendimientos de grano debido a que los índices estimados en elongación se asociaron a la producción final, tal como fuese observado por Lemaire *et al.* (2008). El valor crítico para la producción de biomasa propuesto en base a los resultados de este trabajo es de 1,04 y 0,88 para INN e INS respectivamente.

Los niveles de suficiencia determinados para cada nutriente son útiles en diagnosticar el estado nutricional del cultivo en ese momento, capacidad de diagnóstico, pero pueden diferir de los valores óptimos necesarios para lograr el máximo rendimiento de grano, los que se asocian a la capacidad de predicción de éstos indicadores, (Figura 3 a y b).

El INN se relacionó lineal y positivamente con la producción de grano sólo para la condición *azufre limitante*. La falta de relación para la condición *azufre suficiente* responde a que todas las parcelas también tuvieron un INN en el rango definido como no limitante. Como lo discuten Reussi *et al.* (2012), la absorción de N y S están relacionadas y, en condiciones de consumo de lujo de Nt en C1, la cantidad de St absorbida se incrementa, mejorando el estado nutricional de la planta. La cantidad media de St absorbida en la condición *azufre suficiente* fue de 17,5 Kg ha<sup>-1</sup>, con un mínimo de 6 Kg ha<sup>-1</sup>. En tanto, en *azufre limitante*, con una media de 5,6 Kg ha<sup>-1</sup> de St absorbido, alcanzó 6,3 y 7,3 Kg ha<sup>-1</sup> para el mínimo y media respectivamente cuando el INN fue superior a 1,04 (valor crítico establecido para producción de biomasa en C1). Esto estaría indicando la necesidad de una cantidad mínima absorbida de S (superior a 6 Kg ha<sup>-1</sup>) para alcanzar el rango de rendimiento máximo. Por tanto, al considerar solamente la producción de grano, la nutrición azufrada en C1 estaría afectando la eficiencia de uso del Nt absorbido hasta C1,

requiriéndose, para lograr los máximos rendimientos, un INN superior al crítico establecido para biomasa en C1.

Si bien el aumento en la concentración de azufre en la planta aumentó la relación St:Nt, afectando positivamente el contenido de aceite en grano, resultados estos similares a los reportados por Brennan y Bolland (2008) y Malhi *et al.* (2007) y valor crítico coincidente al logrado por Hocking *et al.* (1996) para plantas con adecuado suministro de azufre, cuando se considera la producción de aceite por unidad de superficie, el rendimiento de grano tuvo mayor impacto que la concentración de aceite. Por tanto, el manejo nutricional del cultivo necesario para obtener máximos rendimientos de grano fue también válido para alcanzar la máxima producción de aceite por unidad de superficie.

## **2.7. AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo formó parte del proyecto de tesis de Maestría en Ciencias Agrarias de Gonzalo Ferreira en la Universidad de la República. El proyecto fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), mediante el Fondo María Viñas y beca de posgrado. Agradecemos a ADP, Unicampo Uruguay S.R.L. y Javier Moreira por proporcionar las chacras para la realización de los ensayos. Un especial agradecimiento al Ing. Agr. Oswaldo Ernst, orientador del proyecto, y al personal del campo experimental de la EEMAC que colaboró durante el procesamiento de las muestras, en especial al técnico Darío Fross.

## **2.8. BIBLIOGRAFÍA**

**Andrade FH, Echeverría HE, González NS, Uhart SA.** 1996. Requerimientos de nitrógeno y fósforo de los cultivos de maíz, girasol y soja. Buenos Aires: INTA. 17 p. (Boletín Técnico; 134).

- Arce de Caram G, Angeloni P, Prause J, Angeloni M.** 2003. Utilidad de la Curva de dilución del Nitrógeno para determinar el estatus nitrogenado en distintos estadios fenológicos del Girasol, en Sáenz Peña, Provincia del Chaco. Universidad Nacional Del Nordeste. *Comunicaciones científicas y Tecnológicas 2003*. pp 3.
- Brennan RF, Bolland MD.** 2008. Significant nitrogen by sulfur interactions occurred for canola grain production and oil concentration in grain on sandy soils in the Mediterranean-type climate of southwestern. *Australian Journal of Plant Nutrition*, 31(7): 1174 - 1187.
- Brennan RF, Bolland MD.** 2006. Soil and tissue tests to predict the sulfur requirements of canola in south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46(8): 1061 - 1068
- Cate RB, Nelson LA.** 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *The Journal of the Soil Science Society of America*, 35: 658-60.
- Colnenne C, Meynard J, Reau R, Justes E, Merrien A.** 1998. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of botany*, 81: 311 - 317.
- Dijkshoorn W, Lampe J, Van Burg P.** 1960. A method of diagnosing the sulphur nutrition status of herbage. *Plant and Soil*, 13(3): 227 - 241.
- Dijkshoorn W, Van Wijk A.** 1967. The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter a review of published data. *Plant and Soil*, 26(1): 129 - 157.
- Gastal F, Lemaire G.** 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, 53(370): 789-799.

- Greenwood D, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson J.** 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany*, 66: 425–436.
- Greenwood D.** 2001. Modeling N response of field vegetable crops grown under diverse conditions with N<sub>able</sub>: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 24(11): 1799 - 1815.
- Hocking P, Pinkerton A, Good A.** 1996. Recovery of field-grown canola from sulfur deficiency. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 36 (1): 79 - 85
- Hocking P, Randall P, Marco D, Bamforth I.** 1997. Assessment of the nitrogen status of field-grown canola (*Brassica napus*) by plant analysis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 37(1): 83 - 92.
- Hřivna L, Richter R, Rašková J.** 2004. The correction of sulphur nutrition of winter rape (*Brassica napus* L.). *Rośliny Oleiste*, XXV(1): 137 - 144.
- Justes E, Mary B, Meynard J, Machet J, Thelier-huches L.** 1994. Determination of a critical Nitrogen Dilution Curve for Winter wheats crops. *Annals of botany*, 74: 397 - 407.
- Lemaire G, Meynard J.** 1997. Use of the Nitrogen Nutrition Index for analysis of agronomical data. En: Lemaire G. (Ed). *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Heidelberg: Springer-Verlag. pp. 45 - 55.
- Lemaire G, Gastal F, Plenet D.** 1997. Dynamics of N uptake and N distribution in plant canopies. Use of crop N status index in crop modeling. En: Lemaire G, Burns IG. (Eds.). *Diagnostic procedures for crop N management*. Poitiers, France: Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).pp. 15-29.

- Lemaire G, Jeuffroy M, Gastal F.** 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28(4): 614 - 624.
- Malagoli P, Laine P, Rossato L, Ourry A.** 2005. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest. *Annals of botany*, 95: 853 – 861.
- Malhi S, Gan Y, Raney J.** 2007. Yield, seed quality, and sulfur uptake of brassica oilseed crops in response to sulfur fertilization. *Agronomy Journal*, 99: 570 – 577.
- Merrien A.** 1992. La Physiologie du Tournesol. *Les Points Techniques Du CETIOM*, 1992. 66 pp.
- Orlovius K.** 2003. Oilseed rape. En: Kirbky, EA (Ed.). *Fertilizing for High Yield and Quality*. Kassel, Germany: International Potash Institute (16). 125 pp.
- Ozer H.** 2003. Sowing date and nitrogen rate effects on growth, yield and yield components of two summer rapeseed cultivars. *European Journal of Agronomy*, 19(3): 453 - 463.
- Pinkerton A.** 1998. Critical sulfur concentrations in oilseed rape (*Brassica napus*) in relation to nitrogen supply and to plant age. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38: 511 - 522.
- Plank C, Tucker M.** 2000. Field Crops: Canola. En: Campbell CR. (Ed.). *Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States*. North Carolina. (Southern Cooperative Series Bulletin, 394). pp. 9 - 10.
- Plenet D, Lemaire G.** 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil*, 216: 65 – 82.

- Rathke G, Schuster C.** 2001. Yield and quality of winter oilseed rape related to nitrogen supply. En: Horst W, Schenk M, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer W, Goldbach H, Olf H, Römheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schubert S, Von Wirén N, Wittenmayer L. (Eds.). *Plant Nutrition: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research*. New York: Springer Netherlands (Developments in *Plant and Soil Sciences*, 92). pp. 798 - 799.
- Reussi N, Echeverría H, 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.
- Zamora M, Massigoge J.** 2008. Fertilización de colza: respuesta a la aplicación de N y S en el centro-sur bonaerense. En: Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, 13 al 16 mayo.

### **3. RESPUESTA DEL CULTIVO DE COLZA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA**

#### **3.1. RESUMEN**

La colza es un cultivo muy exigente en nitrógeno (N), por lo que para lograr una producción sostenible se requiere un eficiente suministro de este nutriente y además es necesaria la complementación con azufre (S). La mayoría de los aportes estudian la respuesta a la aplicación de fertilizante independientemente del estado nutricional del cultivo. El objetivo del presente trabajo es proponer dosis de fertilización nitrogenada en base a índices de nutrición nitrogenada (INN) y azufrada del cultivo, a partir de la concentración de N y S en planta al estadio de elongación (C1). La respuesta al agregado de N en C1 existió solamente para el rango de datos diagnosticados como N *limitante* para producción de biomasa en C1 y en condiciones de S *suficiente*. Para estas condiciones se determinó como dosis óptima de N en C1 60 Kg N ha<sup>-1</sup>. El INN en C1 estuvo afectado por la cantidad total de N aplicado en siembra más estado vegetativo y no por las dosis únicas a la siembra, pero lo hizo solamente cuando el S fue *suficiente*. Para esta situación se determinó un nivel crítico de referencia de N total agregado hasta C1 de 77 Kg N ha<sup>-1</sup> que permitió alcanzar un valor mínimo promedio de INN en C1 de 1,04. Ambos tipos de colza demostraron similar comportamiento en términos de estado nutricional, pero los niveles críticos de N absorbido (Nabs) necesarios para alcanzar niveles de INN no limitante en planta a C1 fueron 54 y 143 Kg Nabs ha<sup>-1</sup> para primaverales e invernales respectivamente.

**Palabras clave:** dosis, rendimiento, fraccionamiento, nitrógeno absorbido, requerimiento nutricional.

#### **3.2. SUMMARY**

Rape is very demanding crop nitrogen (N), so that to achieve sustainable production efficient supply of this nutrient is required and it is necessary supplementation with sulfur (S). Most input response study fertilizer application regardless of nutritional status of the crop. The aim of this paper is to propose nitrogen rates based on nitrogen nutrition index (INN) and sulfur crop, from the

concentration of N and S in the stage of plant elongation (C1). The response to added N in C1 existed only for the data range diagnosed as N limiting for biomass production in C1 and S sufficient condition. For these conditions was determined as optimal dose of N in C1 60 Kg N ha<sup>-1</sup>. The INN at C1 was affected by the total amount of N applied at planting more vegetative state and not by sowing the only dose, but did only when S was enough. For this situation a critical baseline total N added to C1 77 Kg N ha<sup>-1</sup> that achieved a minimum average INN C1 value of 1.04 was determined. Both types of rapeseed showed similar behavior in terms of nutritional status, but critical levels of N absorbed (Nabs) to achieve levels INN not limiting plant in C1 were 54 and 143 Kg Nabs ha<sup>-1</sup> for spring and winter respectively.

**Key words:** dose, yield, fractionation, nitrogen absorbed, nutritional requirement.

### 3.3. INTRODUCCIÓN

#### 3.3.1. Requerimiento y respuesta del cultivo al nitrógeno

La colza es un cultivo muy exigente en nitrógeno (N) (Triboi-Blondel, 1988; Gambaudo *et al.*, 2008), por lo que es importante considerar no sólo la dosis de fertilizante aplicado, sino el momento en que está disponible para el cultivo (Tamagno *et al.*, 1999).

Hasta el momento no existe información consistente en la bibliografía sobre la respuesta de la producción de canola al agregado de fertilizante dependiente de la concentración de N en la planta al momento de la aplicación. La mayoría de los aportes estudian la respuesta a la aplicación de fertilizante independientemente del estado nutricional del cultivo, o bien lo hacen considerando la concentración de nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en el suelo (Soper, 1971; Nuttall *et al.*, 1992).

Un indicador útil para la detección de deficiencias tempranas de N, es el Índice de nutrición Nitrogenada (INN) propuesto por Lemaire *et al.* (1989), el cual podría ser utilizado como una herramienta en la toma de decisión de la fertilización nitrogenada (Lemaire *et al.*, 2008; Tamagno *et al.*, 1999).

La respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada es variable. Zamora y Massigoge (2008) encontraron respuestas al N aplicado en estadio de roseta dependiendo del año y del nivel de nitratos a la siembra. Los mismos autores reportaron que la respuesta de la colza al agregado de N fue positiva hasta alcanzar los 150 Kg N ha<sup>-1</sup>, sumando lo aportado por el suelo al momento de la siembra (0-60 cm) y el agregado de fertilizante. En tanto, Gambaudo *et al.* (2008), para un rango entre 2000 a 4000 Kg ha<sup>-1</sup> de grano obtuvieron una ecuación lineal de respuesta del rendimiento a la disponibilidad de N, con valores estimados de 11,5 Kg ha<sup>-1</sup> de grano por cada unidad de N disponible. Los autores concluyeron que para obtener rendimientos del entorno de 3000 Kg ha<sup>-1</sup> de grano es necesaria una disponibilidad de 110 Kg N ha<sup>-1</sup>. Por otra parte, la utilización del N absorbido en etapas claves del desarrollo del cultivo también ha sido reportado como un indicador útil en el diagnóstico del estado nutricional en cebada (Baethgen,1992). Este autor, en condiciones de producción de Uruguay, determinó como valor crítico de N absorbido 90 Kg ha<sup>-1</sup> al estado de inicio de elongación de entrenudos en cebada. Reportes de varios autores establecen que éste cultivo es muy exigente en N (Triboi-Blondel, 1988; Gambaudo *et al.*, 2008) y excede los requerimientos de trigo en un 35 a 50 % (Agosti, 2011; Hocking *et al.*, 1997).

En cuanto al momento de fertilización, ensayos realizados en Argentina, muestran que la fertilización sólo provocó aumentos significativos en rendimiento y biomasa cuando se realizó en forma fraccionada. A su vez, el fraccionamiento de la fertilización mejoró la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), pasando de 5,63 Kg de grano por cada unidad de N, cuando se fertilizó con 90 Kg N ha<sup>-1</sup> a la siembra a 11,35 Kg de grano por cada unidad de N cuando fue fraccionada a siembra y al estadio C2, llegando a 13,11 Kg de grano por unidad de N cuando el fraccionamiento se realizó en tres momentos (siembra, C2 y F1). La menor eficiencia para fertilizaciones a siembra sugiere limitada capacidad del cultivo de aprovechar la alta disponibilidad en estadios tempranos (Tamagno *et al.*, 1999), por lo que la aplicación de dosis fraccionadas garantiza la disponibilidad del nutriente en etapas del cultivo importantes para la determinación del rendimiento. Retrasar la fertilización hasta el comienzo de la elongación de tallos, cuando ocurre un elevado consumo de N, o uso

de fertilizantes de liberación lenta, podrían disminuir los riesgos de lavado de nitratos, incrementando la eficiencia agronómica en el uso del nitrógeno y reduciendo el impacto ambiental (Tamagno *et al.*, 1999).

El máximo requerimiento de N en colza se produce cuando se alcanza el 50% de floración, por lo cual se recomienda aplicar este nutriente en estadios previos para sincronizarla oferta del nutriente con la demanda del cultivo (Iriarte y Valetti, 2002). Como el cultivo tiene crecimiento indeterminado, la movilización del nitrógeno para el desarrollo de la canopia puede continuar luego de la floración (Chamorro *et al.*, 2002). Esto determina que puede existir efecto de la fertilización al inicio del desarrollo reproductivo, (Pouzet, 1995), aunque la eficiencia de uso del N agregado se reduce debido a que los componentes del rendimiento están, en su mayoría ya definidos (Gómez y Miralles, 2000).

Si bien el fraccionamiento de la fertilización nunca mostró resultados negativos, los momentos en que deben realizarse las aplicaciones de fertilizante nitrogenado no son claros. Las diferencias pueden ser explicadas por el sitio en particular en que fue evaluado, clima, cultivos anteriores (Planchón y Figares, 2004), y a la elasticidad que presenta el cultivo, por ser de crecimiento indeterminado (Martino *et al.*, 1999). Cuando las condiciones son favorables para el lavado, suelos livianos y fuertes lluvias, el fraccionamiento de la fertilización suele ser preferible, aunque el costo puede llegar a ser mayor que el beneficio en rendimientos (Pouzet, 1995).

### **3.3.2. Efectos del nitrógeno sobre el cultivo**

La fertilización nitrogenada se relaciona con el aumento de rendimiento debido a su efecto sobre el número de silicuas y semillas por unidad de superficie (Tamagno *et al.*, 1999; Allen y Morgan, 1972; y Orlovius, 2003), mejora del índice de área foliar, el peso total de la planta y el número de semillas por silicua (Allen y Morgan, 1972).

Según Almond *et al.* (1986), el mayor efecto del nitrógeno en incrementar los rendimientos fue también por el número de silicuas a cosecha, cuando al menos se mantuvo el número de semillas por silicuas y el tamaño de las semillas, donde el incremento del IAF puede o no llegar a ser importante.

El efecto de la fertilización sobre las silicuas, confirma la sensibilidad de dicho componente a la fertilización nitrogenada, así como la estrecha dependencia de la nutrición carbonada del ápice y los órganos reproductivos y por lo tanto de la actividad fotosintética de las hojas. Una mayor disponibilidad nitrogenada permitirá atrasar la senescencia determinada por la translocación, logrando una mayor persistencia del área foliar (Tamagno *et al.*, 1999).

Además el N ejerce un cierto control en el balance de fitohormonas dentro de la planta, su deficiencia acelera la producción de ácido abscísico 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).

Así como se reportan efectos positivos del N sobre el rendimiento, Almond *et al.*, (1986) afirman que 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 sombreen entre sí dentro del cultivo, a la vez, si las silicuas no absinden, otros factores pueden aparecer reduciendo el rendimiento, o el cultivo puede no proveer suficientes asimilados para completar el llenado de granos, especialmente cuando el máximo IAF ocurre cerca del 50% de floración, luego de lo cual disminuye rápidamente. Por lo tanto niveles de nitrógeno muy altos pueden ser inapropiados (Almond *et al.*, 1986).

### **3.3.3. Interacción nitrógeno-azufre**

Para la obtención de elevados rendimientos es necesaria la complementación de N con azufre (S) por su rol en la producción de proteínas (Orlovius, 2003; Zamora y Massigoge, 2008). Cuando el nitrógeno se combina con aplicaciones de S, las respuestas son lineales y positivas hasta niveles de 200 Kg N ha<sup>-1</sup>, pero si la deficiencia de S no es reconocida o es malinterpretada como deficiencia de N, y se incrementa la fertilización de N, la respuesta es negativa, (Gonzalez Montaner y Di Napoli, 2009).

Según Orlovius (2003), el número de semillas por silicua es escasamente influenciado por la nutrición nitrogenada comparado al efecto de la deficiencia de azufre, incluso cuando la nutrición nitrogenada es adecuada, especialmente en la parte superior de las plantas.

El N y el S se relacionan también por el hecho de que el S juega un papel importante en la activación de la enzima nitrato reductasa, necesaria para la conversión de  $\text{NO}_3^-$  a aminoácidos en las plantas. Una baja actividad de esta enzima reduce los niveles de proteínas solubles, a la vez que incrementa la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en los tejidos de las plantas. La acumulación de altos niveles de  $\text{NO}_3^-$  en las plantas, cuando existe una deficiencia de S, impide drásticamente la formación de semilla en cultivos sensibles como la canola (Agropecstar, citado por Planchón y Figares, 2004), dado los mayores requerimientos de azufre en este cultivo (Merrien, 1997), los cuales se atribuyen al mayor contenido de proteína en la semilla (Dijkshoorn y Van Wijk, 1967). Se han determinado pérdidas de hasta 80% de rendimiento en semilla, y 20% en reducción en la concentración de aceite debido a deficiencias de azufre (Hocking *et al.*, 1996). Deficiencias leves 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.*, 1996).

A diferencia de lo que ocurre con el nitrógeno, el azufre no es removible desde las partes viejas de la planta hacia las que están en activo crecimiento, por lo que al estar implicado en la floración y la formación de granos, deficiencias de este nutriente en dichas etapas de crecimiento del cultivo podrían tener efectos negativos sobre el rendimiento (Malhi, 1999).

Por otra parte se ha reportado que el suministro y consumo excesivo de este nutriente por parte de los cultivos puede generar efectos negativos sobre el rendimiento y crecimiento, por ejemplo en frijoles reducción de hasta 58 % en la biomasa (Ruiz *et al.*, 2005), en brócoli y repollo reducción del rendimiento y biomasa total (Blankenburg, citado por Haneklaus *et al.*, 2007), en maíz reducción de los componentes del rendimiento con dosis de S mayores a  $60 \text{ Kg ha}^{-1}$  (Khan *et al.*, 2006, citados por Haneklaus *et al.* (2007)), en soja reducción de la biomasa y rendimiento con dosis de S de  $240 \text{ Kg ha}^{-1}$ , pero en dosis de 60 y  $90 \text{ Kg ha}^{-1}$  la respuesta en rendimiento y número de nódulos fue positiva (Abbés *et al.*, 1992). En colza no se encontraron reportes de respuesta negativa, solamente mecanismos involucrados en el procesamiento del azufre consumido en exceso (Rennenberg, 1984).

### **3.3.5. Objetivo**

El objetivo del presente trabajo es proponer dosis de fertilización nitrogenada en base a índices de nutrición nitrogenada y azufrada del cultivo, a partir de la concentración de N y S en planta al estadio de elongación para las condiciones de producción en Uruguay.

### **3.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se realizaron cinco experimentos en chacras comerciales del litoral oeste de Uruguay. Los cultivares utilizados fueron de colza tipo primaverales e invernales (Tabla 1). El diseño experimental utilizado fue factorial incompleto con tres repeticiones en todos los casos.

Tabla 1: Características de los ensayos realizados.

Sitio	Fecha de siembra	Tipo de colza	Variedad	Momento de fertilización	Familia Textural de suelo
El Puntal	05/05/2010	Primaveral	Rivette	S-B5-C1	Franca
Palmar 1	15/07/2011	Primaveral	Hyola 61	B2-C1-D1	Franco Arenosa con gravas
Palmar 2	15/07/2011	Primaveral	Rivette	B2-C1	Franco Arenosa con gravas
Villa Maruca 1	25/04/2011	Invernal	Pulsar	B2-B7-C1	Limo Arcillosa
Villa Maruca 2	25/04/2011	Invernal	Pulsar	B5-C1	Limo Arcillosa

S: siembra, B2: dos hojas verdaderas desplegadas, B5: cinco hojas verdaderas desplegadas, B7: siete hojas verdaderas desplegadas, C1: comienzo de elongación del tallo, aumento de la vegetación y aparición de hojas jóvenes, D1: yemas unidas cubiertas por hojas terminales, F1: primeras flores abiertas y G2: las 10 primeras silicuas tienen una longitud de entre dos y cuatro cm.

Los tratamientos fueron la combinación de cuatro dosis de nitrógeno (N) (0, 30, 60 y 90 Kg ha<sup>-1</sup>) aplicadas en distintos momentos del ciclo del cultivo (Tabla 1). Del total de las combinaciones posibles se seleccionaron aquellas que: i) la dosis de N agregada a la siembra no superara los 60 Kg ha<sup>-1</sup> y ii) la dosis total agregada durante el ciclo no fuera mayor a 240 Kg ha<sup>-1</sup> de N.

Las fuentes de fertilizantes utilizados fueron urea para nitrógeno, sulfato de amonio en caso de tratamientos con N y S y sulfato de calcio en los tratamientos con

S sin aplicación de N. La disponibilidad de fósforo y potasio en el suelo fueron corregidos a la siembra de manera que no fueran limitantes

#### **3.4.1. Determinaciones**

En cada sitio experimental fue determinado el nivel de N, fósforo, potasio y materia orgánica del suelo al momento de la siembra y además la familia textural (datos presentados en apéndices). En cada estadio de crecimiento mencionado en la Tabla 1, se realizó muestreo de biomasa mediante el corte de plantas en dos metros lineales para la determinación de materia seca aérea y su concentración de nitrógeno total (Nt) y azufre total (St). La cosecha de los experimentos se realizó mediante el corte manual de plantas en dos metros lineales en cada parcela, posterior embolsado y secado a temperatura ambiente hasta que las silicuas alcanzaron su punto de máxima dehiscencia natural para así efectuar la trilla manualmente. Se determinó la cantidad de grano obtenido, su humedad, peso de mil granos y cantidad de silicuas por unidad de superficie. Para determinar el estado fenológico del cultivo se utilizó la escala de CETIOM (2012).

Los valores de las variables climáticas (temperatura y precipitaciones) fueron solicitadas a la Dirección Nacional de Meteorología para la localidad más próxima a cada sitio experimental (datos presentados en apéndices).

#### **3.4.2. Análisis de datos**

Al trabajar con valores de variables determinadas en diferentes sitios experimentales, cada uno de ellos con diferentes tipos de suelos, ubicación geográfica, variedades, manejo, etc., fue necesario convertir los valores absolutos de las variables a analizar en valores relativos. Para ello se relativizaron los valores de cada parcela con relación al valor 100 de cada sitio, correspondiente a la parcela de mayor rendimiento.

Los datos fueron analizados utilizando el software estadístico Infostat 2011/E.

##### **3.4.2.1. Dosis óptima de nitrógeno según estado nutricional**

Los indicadores y valores del estado nutricional nitrogenado y azufrado a elongación (C1) estimados en el capítulo anterior, fueron utilizados para separar situaciones definidas como limitantes o no. Se realizó un análisis de varianza para

determinar el efecto de las dosis de N agregado como fertilizante sobre el rendimiento relativo de grano particionado por el estado nitrogenado del cultivo al estadio C1 (*N limitante* y *N no limitante*). El criterio para seleccionar la dosis óptima consistió en tomar la cantidad de N aplicada que generó el mayor rendimiento de grano estadísticamente significativo. En el caso de que fueran dos o más dosis las que generaron éste máximo rendimiento, se seleccionó la de menor cantidad de N. El mismo procedimiento se realizó particionado por estado azufrado, generando así cuatro grupos con estado nutricional diferente (N limitante/S limitante, N limitante/S no limitante, N no limitante/S limitante y N no limitante/S no limitante).

#### **3.4.2.3. Estado nutricional nitrogenado a elongación en base al manejo previo de la fertilización**

Se estudió el efecto de la aplicación de N en etapas previas a C1 (desde siembra inclusive) sobre el estado nutricional nitrogenado logrado a C1. Se realizó un análisis de regresión entre el INN y la cantidad total de N agregado hasta C1 para cada estado azufrado. Se ajustó un modelo lineal plateau con dos tramos para detectar la existencia de un nivel crítico de N agregado durante la etapa vegetativa para alcanzar el óptimo estado nitrogenado a C1 (Infostat).

Para proponer valores críticos de referencia de nitrógeno absorbido (Nabs.) hasta C1 necesarios para lograr el óptimo estado nutricional nitrogenado a C1, se realizó un análisis de regresión simple entre Nabs y el INN a C1 para cada tipo de colza.

### **3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.5.1. Dosis óptima de nitrógeno según estado nutricional en elongación**

Los indicadores de diagnóstico para N y S combinados, generaron cuatro situaciones nutricionales diferentes con sus respectivos niveles promedios. A partir de estas situaciones, se determinaron como dosis óptimas de N en C1 (DON) 0 y 60 Kg N ha<sup>-1</sup> para la condición de *N no limitante* y *N limitante* respectivamente, logrando en ambos casos rendimientos relativos máximos similares (Tabla 2), confirmando lo propuesto por algunos autores (Lemaire *et al.*, 2008; Tamagno *et al.*, 1999) en cuanto a la utilidad del índice. Al particionar los datos por la condición de

nutrición azufrada, la DON de 60 Kg N ha<sup>-1</sup> se mantuvo solamente en la combinación de N *limitante* y S *suficiente*, en el resto de las combinaciones la DON estimada fue cero. Estos resultados sugieren que en condiciones de nutrición azufrada *suficiente*, la restricción de N *limitante* se puede levantar con la aplicación de fertilizante nitrogenado en elongación. Esta dosis óptima de N a aplicar en C1, surgida del presente trabajo, puede considerarse como valor máximo a aplicar en las condiciones de suelo y clima de Uruguay, para evitar la pérdida de nutriente por lavado, condiciones en las cuales el fraccionamiento de la fertilización nitrogenada total en el ciclo del cultivo suele ser preferible, según lo expuesto por Pouzet, 1995. Además, como fuese reportado por Almond *et al.*, (1986), dosis elevadas de N, impedirían alcanzar el máximo rendimiento, ya que pueden formarse silicuas en exceso, las cuales se sombreen entre sí dentro del cultivo, o el cultivo puede no proveer suficientes asimilados para completar el llenado de granos

Tabla 2: Dosis óptimas de Nitrógeno en elongación para obtener rendimientos máximos en base al estado nutricional nitrogenado y azufrado en C1.

Estado Nitrogenado	DON	Rinde Relativo %	INN C1	Estado Adufrado	DON	Rinde Relativo %	INN C1	Rinde absoluto (Kg ha <sup>-1</sup> )
Limitante	60**	86.4	0.92 (0.61 -1.04)	Limitante	0*	85.4	0.91	2689 d
				No Limitante	60*	86.7	0.93	3498 a
No Limitante	0	87.5	1.07 (1.06-1.39)	Limitante	0	88.4	1.04	2879 cd
				No Limitante	0	88.2	1.07	3105 bc

\*: DON determinada por efecto significativo de las dosis aplicadas en el grupo de datos respectivo, \* y \*\* corresponden a 10 y 5 % de nivel de significancia correspondientemente. Medias con una letra común dentro de una misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ). Valores entre paréntesis representan el rango de variación.

En términos relativos los rendimientos alcanzados en cada situación descripta en la Tabla 1 fueron similares, pero en términos absolutos el mayor rendimiento ( $p < 0,05$ ) se logró en la situación N *limitante*-S *suficiente* con el agregado de 60 Kg ha<sup>-1</sup>

de N en C1. La nutrición azufrada jugó un rol importante en cuanto a que los rendimientos absolutos más bajos se lograron en situaciones de *S limitante*. Esta importancia del S en la obtención de elevados rendimientos fue marcada por Orlovius (2003) y Zamora y Massigoge (2008).

La relativamente escasa variabilidad lograda en el INN, particularmente en valores por debajo del crítico, no permitió establecer ecuaciones de ajuste de dosis en función del indicador considerado.

### **3.5.2. Estado nutricional nitrogenado a elongación en base al manejo previo de la fertilización**

Dada la importancia del estado nutricional del cultivo en C1, se estudió el efecto del manejo de la fertilización nitrogenada previo a este estadio.

El cultivo no demostró sensibilidad en su INN en C1 a las dosis aplicadas a la siembra ( $p=0,35$ ), (INN de 0,96, 0,94 y 0,91 para 0, 30 y 60 Kg N ha<sup>-1</sup> a la siembra respectivamente). Sin embargo, se detectó efecto significativo de la cantidad total de N agregado durante la etapa de crecimiento vegetativo ( $p < 0,0001$ ), que incluyó la sumatoria de siembra y formación de roseta, pero solamente para la condición de *S suficiente* (Figura 1). Como fue reportado por Tamagno *et al.* (1999), el cultivo posee una limitada capacidad de aprovechar la alta disponibilidad en estadios tempranos, y al igual que otros autores (Pouzet, 1995; Iriarte y Valetti, 2002) sugieren fraccionar la fertilización durante estadios vegetativos hasta comienzo de la elongación de tallos inclusive. Para esta situación se determinó un nivel crítico de referencia de nitrógeno total agregado hasta C1 de 77 Kg N ha<sup>-1</sup> para alcanzar el INN crítico en C1 de 1,04. Este valor de INN en C1 obtenido coincide con el determinado como valor crítico en elongación para lograr el 90 % de producción de materia seca en el mismo momento

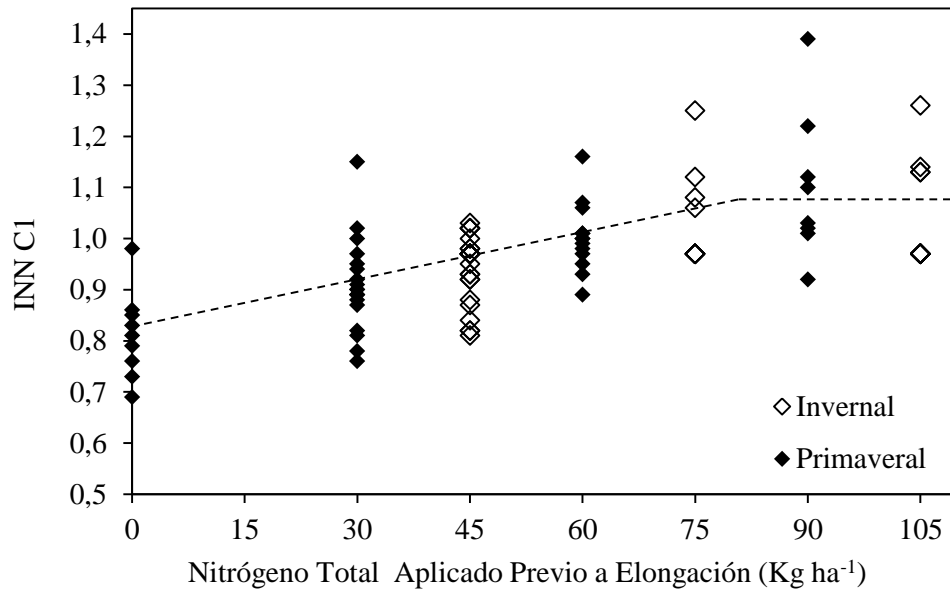


Figura 1: Índice de nutrición nitrogenado obtenido en elongación en función del agregado total de nitrógeno previo a elongación (siembra, B2 y/o B5) para ambos tipos de colza en condición de S suficiente. La función ajustada para el conjunto de los datos corresponde a una lineal-plateau (Tabla 3).

Tabla 3: Valores estadísticos para los parámetros involucrados en el modelo de regresión lineal con plateau y matriz de correlación de las estimaciones presentada en la figura 1.

Parámetros	Estimación	Error Estándar	p-valor	Matriz de correlación		
				Alfa	Beta	Gamma
<b>Alfa</b>	0.81	0.02	<0,0001	1.00	-0.90	0.39
<b>Beta</b>	0.003	0.00049	<0,0001	-0.90	1.00	-0.62
<b>Gamma</b>	76.9	9.2	<0,0001	0.39	-0.62	1.00

$$INN C1 = 0,81 + (0,003 * DTPE) * (DTPE < \gamma) + (0,81 * 76,9) * (DTPE \geq \gamma)$$

Donde DTPE: Dosis Total de nitrógeno aplicado Previo al momento de Elongación, incluyendo la siembra.

El hecho de no agregar N durante las etapas previas a elongación, resultó en valores de INN a ese estadio menor a 1,04, diagnosticado como limitante para

producción óptima de materia seca a C1 y en la cual es esperable obtener respuesta en rendimiento al agregado de N.

Los resultados indican que, para condiciones de *S suficiente*, existirían dos estrategias de manejo de la fertilización nitrogenada, i) Agregar N en etapas previas a elongación como para aumentar las probabilidades de llegar a este estadio con un INN mayor, o lo más próximo posible, a 1,04 (en este caso, 77 Kg N ha<sup>-1</sup>) o ii) para niveles de INN C1 < 1,04, corregir en ese momento con 60 Kg N ha<sup>-1</sup>.

Para la situación *S limitante* no se detectó relación significativa entre las variables ( $p=0,74$ ), indicando nuevamente que el S fue el primer nutriente limitante en el contexto del presente trabajo. Por lo tanto, en condición de *S limitante*, la aplicación de N en etapas vegetativas sería un manejo innecesario.

Se encontró una relación lineal positiva muy significativa entre Nabs y el INN en C1 ( $p < 0,0001$ ), lográndose distinguir dos grupos de datos formados por diferentes tipos de colza (Figura 2). Un rango inferior, que varió desde 15 a 100 Kg Nabs ha<sup>-1</sup> correspondió a las variedades de tipo primaverales y el rango de datos con valores entre 100 y 175 Kg Nabs ha<sup>-1</sup>, a la variedad de tipo invernal. Estas cantidades diferentes de Nabs se explican principalmente por la diferencia en cantidad de materia seca acumulada (800 vs 4547 Kg MS ha<sup>-1</sup> para primaveral e invernal respectivamente) más que en la concentración de N (5,4 % vs 3,0 % respectivamente) y justifica la corrección por biomasa incluida en el INN.

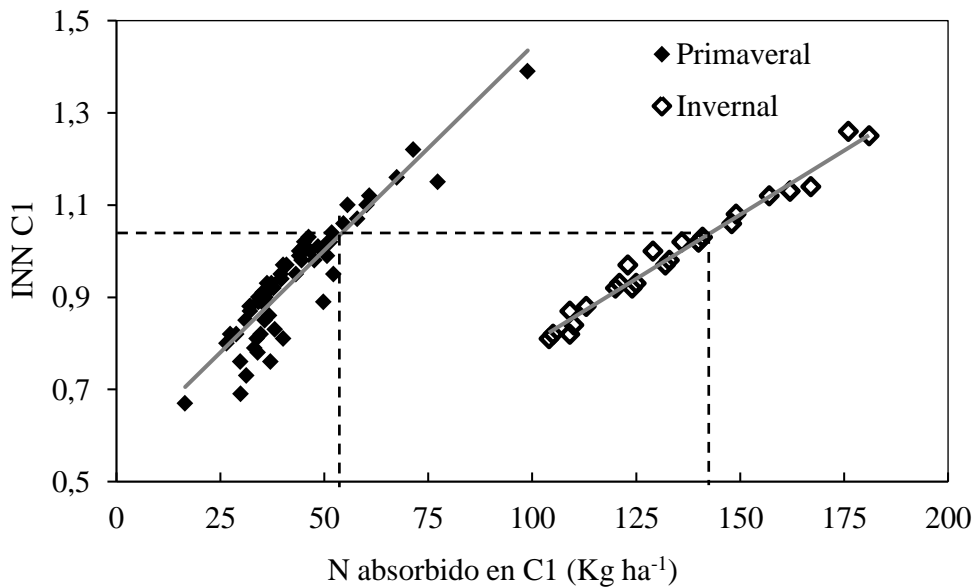


Figura 2: Estado nutricional nitrogenado en elongación en función de la cantidad de nitrógeno absorbido hasta el mismo momento para los dos tipos de colza, primaveral e invernal. Líneas grises (—) corresponden con las curvas de regresión lineal para cada serie de datos. Las líneas punteadas (---) indican los valores en las coordenadas en los cuales se corresponde el cruce de la línea de regresión con el valor de INN = 1,04.

$$\text{INN C1 primaverales} = 0,56 + 0,0089 * \text{Kg Nabs} \quad (R^2 \text{ Ajustado } 0,84, p < 0,0001)$$

$$\text{INN C1 invernales} = 0,24 + 0,0056 * \text{Kg Nabs} \quad (R^2 \text{ Ajustado } 0,98, p < 0,0001)$$

Interpretando los parámetros a y b de las ecuaciones anteriores, se puede identificar una menor eficiencia del cultivo invernal en la utilización del Nabs en términos de estado nutricional, por tener valores inferiores a los primaverales. Esto representa que a igual Nabs en C1 las invernales tendrán menor índice de nutrición nitrogenada.

En base a las regresiones lineales determinadas en la figura 2 y el nivel crítico de INN en C1 para producción de materia seca, los valores críticos de referencia para cantidad de Nabs a partir de los cuales se logran condiciones de INN superior a 1,04 fueron de 54 y 143 Kg Nabs ha<sup>-1</sup> para primaveral e invernal respectivamente. Si bien

ambos tipos de colza demostraron similar comportamiento en términos de estado nutricional, los niveles absolutos registrados de Nabs en planta a elongación fueron muy diferentes. Estos datos sugieren que el INN propuesto como indicador de estado nutricional responde de igual forma al manejo previo de la fertilización en ambos tipos de colza, pero en el cultivo de tipo invernal debió de existir mayor aporte de N desde el suelo para satisfacer la necesidad de Nabs requerido para alcanzar el estado nutricional óptimo a C1. Este mayor aporte de N desde el suelo resultaría del mayor número de días desde siembra a C1 (57 vs 120 días para primaveral e invernal respectivamente). Comparando los valores de Nabs con lo reportado por Baethgen (1992) para cebada, el cultivo de colza tipo invernal estaría superando los niveles críticos de requerimiento de N de aquel cultivo y confirmando lo mencionado por varios autores en esta característica del cultivo de colza (Agosti, 2011; Hocking *et al.*, 1997; Triboui-Blondel, 1988; Gambaudo *et al.*, 2008).

### 3.6. CONCLUSIONES

Cantidades de 54 y 143 Kg N ha<sup>-1</sup> absorbidos hasta C1 para primaveral e invernal respectivamente, permitió al cultivo llegar a este estadio con un INN mayor al crítico establecido y alcanzar rendimientos máximos sin la necesidad de nuevo agregado de N. El agregado de al menos 77 Kg N ha<sup>-1</sup> fraccionados en estadios previos a elongación aumentó la probabilidad de alcanzar valores de INN C1 mayores al crítico establecido para este estadio.

Cuando el INN fue inferior al óptimo determinado para C1 se hace necesaria la complementación con 60 Kg N ha<sup>-1</sup> para lograr los rendimientos máximos.

Las conclusiones son válidas solamente cuando el cultivo es diagnosticado en condición de S *suficiente*, por el contrario no se detectó respuesta al agregado de N en el estado nutricional ni en rendimiento cuando la condición de S fue *limitante*.

### 3.7. BIBLIOGRAFÍA

- Abbés C, Karam A, Isfan D, Parent LE.** 1992. Fertilisation soufrée du soja. *Canadian Journal of Plant Science*, 72: 377–382.
- Agosti MB.** 2011. Fertilización nitrógeno-azufrada y variabilidad genotípica en el rendimiento y la calidad de grano en colza- canola (*Brassica napus* L.). Tesis Magister, Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad Agronomía. 144 p.
- Allen EJ, Morgan ND.** 1972. A quantitative analysis of the effects of nitrogen on the growth, development and yield of oilseed rape. *The Journal of Agricultural Science*, Cambridge, 78: 315-324.
- Almond JA, Dawkins TC, Askew MF.** 1986. Aspects of crop husbandry. En: Daniels RW, Scarisbrick DH, Smith LJ (Eds). *Oilseed rape*. Collins, London: 127-165.
- Baethgen W.** 1992. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Montevideo: INIA. 59p. (Serie técnica; 24).
- Chamorro AM, Tamagno LN, Bezus R, Sarandon SJ.** 2002. Nitrogen accumulation, partition, and nitrogen-use efficiency in canola under different nitrogen availabilities. *Soil Science and Plant Analysis*, 33: 493-504.
- Dijkshoorn W, Van Wijk A.** 1967. The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter a review of published data. *Plant and Soil*, 26(1): 129 - 157.
- Gambaudo S, Fontanetto H, Kuchen MG.** 2008. Fertilización de colza con nitrógeno y azufre en la región central de santa fe. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Publicación miscelánea n° 109. Santa Fe, Argentina. pp. 93-100.

- Gómez NV, Miralles DJ.** 2000. Cambios en la duración de las etapas vegetativa y reproductiva en respuesta al fotoperiodo en colza-canola. En: XXIII Reunión Argentina de Fisiología Vegetal, 2000, Río Cuarto. Sociedad Argentina de Fisiología Vegetal, Universidad Nacional de Río Cuarto. pp 272-273.
- Gonzalez Montaner y 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: García FO y Ciampitti IA (eds.). Simposio de Fertilidad 2009 “Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos”. Santa Fe, Argentina: International Plant Nutrition Institute, Cono Sur.
- Haneklaus S, Bloem E, Schnug E.** 2007. Sulfur Interactions in crop ecosystems. En: Hawkesford MJ y De Kok LJ (Eds). Sulfur in Plants: An Ecological Perspective. Holanda: Springer. 17-58
- Hocking P, Pinkerton A, Good A.** 1996. Recovery of field grown canola from sulfur deficiency. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 36(1): 79 – 85.
- Hocking P, Randall P, Marco D, Bamforth I.** 1997. Assessment of the nitrogen status of field-grown canola (*Brassica napus*) by plant analysis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 37(1): 83 - 92.
- Iriarte LB y Valetti O.** 2002. El cultivo de colza en Argentina. *IDIA XXI*, 3: 160-166.
- Khan MJ, Khan MH, Khattak RA.** 2006. Response of maize to different levels of sulfur. *Journal of Soil Science Plant Analysis*, 37: 41–51
- Lemaire G, Gastal F, Salette J.** 1989. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. Proceedings XVI International Grassland Congress. pp: 179-180

- Lemaire G, Jeuffroy MH, Gastal F.** 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28(4): 614-624
- Malhi SS.** 1999. Restoring canola yield by applying sulphur fertilizer during the growing season. En: Lee DW (Ed). *Agrium Symposium: Sulfur fertility and fertilizers*, 1998. Canada. pp 51-55.
- Martino D, Ponce De Leon F.** 1999. Canola: una alternativa promisorio. Montevideo: INIA. 98p. (Serie técnica; 105).
- Merrien A.** 1997. Note about sulphur fertilization of winter rapeseed. *Romanian agricultural research*, 7(8): 9 pp.
- Orlovius K.** 2003. Oilseed rape. En: Kirbky EA (Ed.). *Fertilizing for High Yield and Quality*. Kassel, Germany. International Potash Institute (16). 125 pp.
- Planchón ME, Figares HJ.** 2004. Fertilización en colza-canola (*Brassica napus* L.): Fenología y época de siembra en cultivares de B. Napus, B. Rapa y B. Juncea. Tesis Ingeniero Agrónomo. Montevideo, Uruguay. Facultad Agronomía. 143 p.
- Pouzet, A.** 1995. Agronomy. En: Kimberr D, Mc Gregor DI (Eds). *Brassica oilseeds: Production and utilization*. United Kingdom: CAB international. pp. 65-95.
- Rennenberg H.** 1984. Fate of excess sulfur in higher plants. *Annual Revision Plant Physiology*, 35: 121-153.
- Ruiz JM, Rivero RM, Romero L.** 2005. Regulation of nitrogen assimilation by sulfur in bean. *Journal of Plant Nutrition*, 28: 1163–1174.
- Soper RJ.** 1971. Soil test as a means of predicting response of rape to added N, P, and K. *Agronomy Journal*, 63: 564-566.

- Tamagno LN, Chamorro AM, Sarandón SJ.** 1999. Aplicación fraccionada de nitrógeno en colza (*Brassica napus* L. spp oleifera forma annua): efectos sobre el rendimiento y la calidad de la semilla. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata 104 (1): 25-34
- Triboi-Blondel AM.** 1988. Azote, croissance, rendement et qualité de la graine chez le colza d'hiver. Physiologie et élaboration du rendement du colza d'hiver. Centre Technique Interprofessionel des Oleagineux Metropolitains (CETIOM). Pp: 134-139.
- Zamora M, Massigoge J.** 2008. Fertilización de colza: respuesta a la aplicación de N y S en el centro-sur bonaerense. En: Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, 13 al 16 mayo.

#### **4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN GLOBAL**

El resultado principal y eje del diagnóstico del estado nutricional del cultivo fue la obtención de las curvas de dilución de la concentración crítica de Nt y St en la biomasa total de la planta, la cual se redujo con el progreso del ciclo del cultivo.

El uso de la relación N/S como indicador de diagnóstico no fue aceptable debido a que la tasa de dilución del S crítico (Sc) resultó menor a la del N crítico (Nc) durante el ciclo del cultivo estudiado por lo cual se generó una relación Nc/Sc variable entre 3,3 y 6,9, sin un patrón de comportamiento en relación a la acumulación de biomasa del cultivo.

El INN e INS, calculados a partir de la concentración de Nt y St en planta y la materia seca producida hasta C1 fueron indicadores útiles para diagnosticar el estado nutricional del cultivo en elongación, momento en el cual es adecuado tomar acciones para su corrección mediante el agregado de fertilizante al suelo con el objetivo de alcanzar máximos rendimientos de grano. En este sentido los valores críticos para la producción de biomasa propuestos en base a los resultados de este trabajo fueron de 1,04 y 0,88 para INN e INS respectivamente, pero difirieron de los valores óptimos necesarios para lograr el máximo rendimiento de grano, los que se asocian a la capacidad de predicción de éstos indicadores. En este sentido se encontró nivel crítico solamente para el INS, mientras que el INN se relacionó lineal y positivamente con la producción de grano sólo para la condición azufre *limitante*.

A pesar de esta ausencia de nivel crítico para producción de grano, el INN crítico determinado para producción de biomasa en C1 fue apto en predecir la respuesta del cultivo al agregado de N debido a que la respuesta fue obtenida solamente en el rango de datos diagnosticados en situación de N *limitante*, pero S *suficiente*. Estos resultados sugieren que en condiciones de nutrición azufrada suficiente la deficiencia de N se puede levantar con la aplicación de 60 Kg N ha<sup>-1</sup> en ese estadio, la cual se puede considerar agrónomicamente apta para aplicar en las condiciones de producción de Uruguay.

La nutrición azufrada jugó un rol muy importante, dado que los rendimientos absolutos más bajos se lograron en situaciones de *S limitante* y además condicionó la respuesta del cultivo al estado nutricional nitrogenado y al agregado de N en C1.

Para ambos tipos de colza, se detectó que con el agregado de 77 Kg N ha<sup>-1</sup> previo a C1 es posible alcanzar niveles de nutrición nitrogenada a ese estadio no limitante para el rendimiento de grano. Pero los niveles absolutos registrados de N absorbido en planta a elongación entre tipos de colza fueron muy diferentes dado principalmente por la diferencia en cantidad de materia seca acumulada más que en la concentración de N en la biomasa. Por lo tanto en el cultivo de tipo invernal existió mayor aporte de N desde el suelo para satisfacer la necesidad de Nabs requerido para alcanzar el estado nutricional óptimo a C1.

Los resultados de la presente investigación suman información de vital importancia al momento de la toma de decisión en el manejo de la fertilización nitrogenada en un cultivo que es conocido como muy demandante en macronutrientes por lo que su manejo eficiente redundará en beneficios económicos y ambientales. A estos resultados debería de sumarse más años de información para revalidar y/o confirmar los valores de los indicadores propuestos y definir dosis de fertilizante nitrogenado en base a rangos de estado nutricional dentro de la condición de *N limitante*. Aspecto en el cual no se pudo profundizar por falta de suficiente número de parcelas en condición de deficiencia de N y en estado azufrado *suficiente*.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

- Andrade FH, Echeverría HE, González NS, Uhart SA.** 1996. Requerimientos de nitrógeno y fósforo de los cultivos de maíz, girasol y soja. Buenos Aires: INTA. 17 p. (Boletín Técnico; 134).
- Abbés C, Karam A, Isfan D, Parent LE.** 1992. Fertilisation soufrée du soja. *Canadian Journal of Plant Science*, 72: 377–382.
- Agosti MB.** 2011. Fertilización nitrógeno-azufrada y variabilidad genotípica en el rendimiento y la calidad de grano en colza- canola (*Brassica napus* L.). Tesis Magister, Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad Agronomía. 144 p.
- Allen EJ, Morgan ND.** 1972. A quantitative analysis of the effects of nitrogen on the growth, development and yield of oilseed rape. *The Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 78: 315-324.
- Almond JA, Dawkins TC, Askew MF.** 1986. Aspects of crop husbandry. En: Daniels RW, Scarisbrick DH, Smith LJ (eds). *Oilseed rape*. Collins, London: 127-165.
- Arce de Caram G, Angeloni P, Prause J, Angeloni M.** 2003. Utilidad de la Curva de dilución del Nitrógeno para determinar el estatus nitrogenado en distintos estadios fenológicos del Girasol, en Sáenz Peña, Provincia del Chaco. Universidad Nacional Del Nordeste. *Comunicaciones científicas y Tecnológicas 2003*. pp 3.
- Baethgen W.** 1992. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Montevideo: INIA. 59p. (Serie técnica; 24).

- Blake-Kalff MA, Zhao FJ, Hawkesford MJ, McGrath SP.** 2001. Using plant analysis to predict yield losses caused by sulphur deficiency. *Annals of Applied Biology*, 138 (1): 123-127
- Bolland MD, Yeates JS, Clarke MF.** 2003. Comparing different sources of sulphur for high-rainfall pastures in south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 43: 1221–1229.
- Brennan RF, Bolland MD.** 2008. Significant nitrogen by sulfur interactions occurred for canola grain production and oil concentration in grain on sandy soils in the Mediterranean-type climate of southwestern. *Australian Journal of Plant Nutrition*, 31(7): 1174 - 1187.
- Brennan RF, Bolland MD.** 2006. Soil and tissue tests to predict the sulfur requirements of canola in south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46(8): 1061 – 1068.
- Cate RB, Nelson LA.** 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *The Journal of the Soil Science Society of America*, 35: 658-60.
- Chamorro AM, Tamagno LN, Bezus R, Sarandon SJ.** 2002. Nitrogen accumulation, partition, and nitrogen-use efficiency in canola under different nitrogen availabilities. *Soil Science and Plant Analysis*, 33: 493-504.
- Chamorro AM, Tamagno N.** 2004. Producción de materia seca aérea y radical de colza primaveral (*Brassica napus* L. ssp. *oleifera* forma *annua*). *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 105(2): 53-62.
- Colnenne C, Meynard J, Reau R, Justes E, Merrien A.** 1998. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of botany*, 81:

311 - 317.

**Correndo AA, García FO.** 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. *Archivo Agronómico (IPNI)*, 14: 1-8

**Dijkshoorn W, Lampe J, Van Burg P.** 1960. A method of diagnosing the sulphur nutrition status of herbage. *Plant and Soil*, 13(3): 227 - 241.

**Dijkshoorn W, Van Wijk A.** 1967. The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter a review of published data. *Plant and Soil*, 26(1): 129 - 157.

**Gambaudo S, Fontanetto H, Kuchen MG.** 2008. Fertilización de colza con nitrógeno y azufre en la región central de santa fe. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Publicación miscelánea n° 109. Santa Fe, Argentina. pp. 93-100.

**Gastal F, Lemaire G.** 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, 53(370): 789-799.

**Gómez NV, Miralles DJ.** 2000. Cambios en la duración de las etapas vegetativa y reproductiva en respuesta al fotoperiodo en colza-canola. En: XXIII Reunión Argentina de Fisiología Vegetal, 2000, Río Cuarto. Sociedad Argentina de Fisiología Vegetal, Universidad Nacional de Río Cuarto. pp 272-273.

**Gonzalez Montaner y 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: García FO y Ciampitti IA (eds.). Simposio de Fertilidad 2009 “Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos”. Santa Fe, Argentina: International Plant Nutrition Institute, Cono Sur.

- Greenwood D, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson J.** 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany*, 66: 425–436.
- Greenwood D.** 2001. Modeling N response of field vegetable crops grown under diverse conditions with N<sub>able</sub>: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 24(11): 1799 - 1815.
- Haneklaus S, Bloem E, Schnug E.** 2007. Sulfur Interactions in crop ecosystems. En: Hawkesford MJ y De Kok LJ (Eds). *Sulfur in Plants: An Ecological Perspective*. Holanda: Springer. 17-58
- Hocking P, Pinkerton A, Good A.** 1996. Recovery of field-grown canola from sulfur deficiency. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 36(1): 79 – 85
- Hocking P, Randall P, Marco D, Bamforth I.** 1997. Assessment of the nitrogen status of field-grown canola (*Brassica napus*) by plant analysis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 37(1): 83 - 92.
- Hřivna L, Richter R, Rašková J.** 2004. The correction of sulphur nutrition of winter rape (*Brassica napus* L.). *Rośliny Oleiste*, XXV(1): 137 - 144.
- Iriarte LB y Valetti O.** 2002. El cultivo de colza en Argentina. *IDIA XXI*, 3: 160-166.
- Justes E, Mary B, Meynard J, Machet J, Thelier-huches L.** 1994. Determination of a critical Nitrogen Dilution Curve for Winter wheats crops. *Annals of botany*, 74: 397 - 407.
- Khan MJ, Khan MH, Khattak RA.** 2006. Response of maize to different levels of sulfur. *Journal of Soil Science Plant Analysis*, 37: 41–51

- Lemaire G, Gastal F, Salette J.** 1989. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. Proceedings XVI International Grassland Congress. Pp: 179-180
- Lemaire G, Gastal F, Plenet D.** 1997. Dynamics of N uptake and N distribution in plant canopies. Use of crop N status index in crop modeling. En: Lemaire G, Burns IG. (Eds.). Diagnostic procedures for crop N management. Poitiers, France: Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).pp. 15-29.
- Lemaire G, Meynard J.** 1997. Use of the Nitrogen Nutrition Index for analysis of agronomical data. En: Lemaire G. (Ed). Diagnosis of the nitrogen status in crops. Heidelberg: Springer-Verlag. pp.45 - 55.
- Lemaire G, Jeuffroy MH, Gastal F.** 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28(4): 614-624
- Malagoli P, Laine P, Rossato L, Ourry A.** 2005. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest. *Annals of botany*, 95: 853 – 861.
- Malhi S.** 1999. Restoring canola yield by applying sulphur fertilizer during the growing season. En: Lee DW (Ed). Agrium Symposium: Sulfur fertility and fertilizers, 1998. Canada. pp 51-55.
- Malhi S, Gan Y, Raney J.** 2007. Yield, seed quality, and sulfur uptake of brassica oilseed crops in response to sulfur fertilization. *Agronomy Journal*, 99: 570–577.
- Martino D, Ponce De Leon F.** 1999. Canola: una alternativa promisoría. Montevideo: INIA. 98p. (Serie técnica; 105).

- Maynard DG, Stewart J W, Bettany JR.** 1983. Use of plant analysis to predict sulfur deficiency in rapeseed (*Brassica napus* and *Brassica campestris*). *Canadian Journal of Soil Science*, 63: 387-396.
- Merrien A.** 1992. La Physiologie du Tournesol. *Les Points Techniques Du CETIOM*, 1992. 66 pp.
- Merrien A.** 1997. Note about sulphur fertilization of winter rapeseed. *Romanian agricultural research*, 7(8): 9 pp.
- Orlovius K.** 2003. Oilseed rape. En: Kirbky EA (Ed.). *Fertilizing for High Yield and Quality*. Kassel, Germany. International Potash Institute (16). 125 pp.
- Ozer H.** 2003. Sowing date and nitrogen rate effects on growth, yield and yield components of two summer rapeseed cultivars. *European Journal of Agronomy*, 19(3): 453 - 463.
- Pinkerton A.** 1998. Critical sulfur concentrations in oilseed rape (*Brassica napus*) in relation to nitrogen supply and to plant age. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38: 511 - 522.
- Planchón ME, Figares HJ.** 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 Agronomía. 143 p.
- Plank C, Tucker M.** 2000. Field Crops: Canola. En: Campbell CR. (Ed.). *Reference sufficiency ranges for plant analysis in the southern region of the United States*. North Carolina. (Southern Cooperative Series Bulletin, 394). pp. 9 - 10.
- Plenet D, Lemaire G.** 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil*, 216: 65 – 82.

- Pouzet, A.** 1995. Agronomy. En: Kimberr D, Mc Gregor DI (Eds). Brassica oilseeds: Production and utilization. United Kingdom: CAB international. pp. 65-95.
- Rathke G, Schuster C.** 2001. Yield and quality of winter oilseed rape related to nitrogen supply. En: Horst W, Schenk M, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer W, Goldbach H, Olf H, Römheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schubert S, Von Wirén N, Wittenmayer L. (Eds.). Plant Nutrition: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. New York: Springer Netherlands. (Developments in *Plant and Soil Sciences*, 92). pp. 798 - 799.
- Rennenberg H.** 1984. Fate of excess sulfur in higher plants. *Annual Revision Plant Physiology*, 35: 121-153
- Reussi N, Echeverría H, 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.
- Ruiz JM, Rivero RM, Romero L.** 2005. Regulation of nitrogen assimilation by sulfur in bean. *Journal of Plant Nutrition*, 28: 1163–1174
- Soper RJ.** 1971. Soil test as a means of predicting response of rape to added N, P, and K. *Agronomy Journal*, 63: 564-566.
- Tamagno LN, Chamorro AM, Sarandón SJ.** 1999. Aplicación fraccionada de nitrógeno en colza (*Brassica napus* L. spp oleifera forma annua): efectos sobre el rendimiento y la calidad de la semilla. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 104 (1): 25-34
- Triboi-Blondel AM.** 1988. Azote, croissance, rendement et qualité de la graine chez le colza d'hiver. Physiologie et élaboration du rendement du colza d'hiver. Centre Technique Interprofessionel des Oleagineux Metropolitains (CETIOM). Pp: 134-139.

**Zamora M, Massigoge J.** 2008. Fertilización de colza: respuesta a la aplicación de N y S en el centro-sur bonaerense. En: Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, 13 al 16 mayo.

**Zhao FJ, McGrath SP.** 1994. Soil extractable sulphate and organic sulphur and their availability to plants. *Plant and Soil*, 164: 243–250.

## 6. ANEXOS

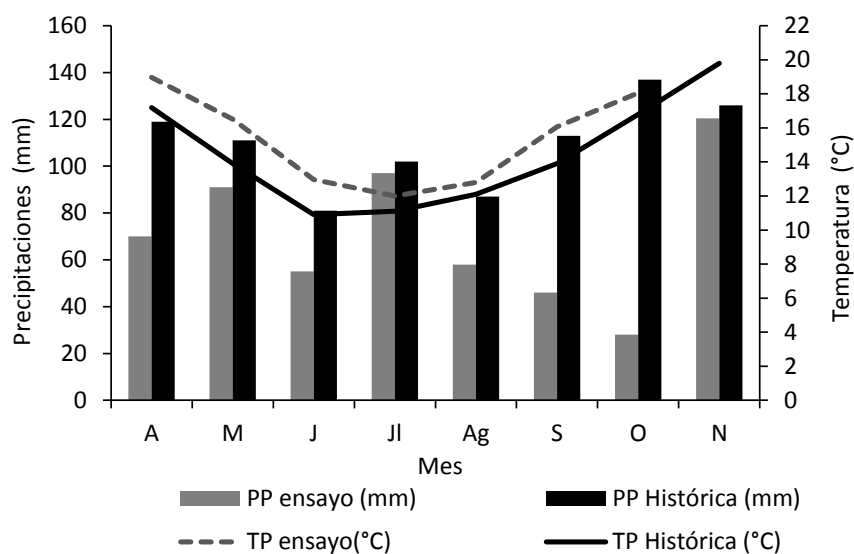
### **6.1. ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DETERMINADAS DE LOS SUELOS EN ENSAYOS A CAMPO.**

Sitio	Coordenadas de Ubicación	P Bray (ppm)	pH (agua)	pH (Kcl)	Materia orgánica (%)	N-NO <sub>3</sub> (ppm)
El Puntal	33°35'13"S 58°13'51"W	10,7	5,85	4,9	3,9	4,05
La Esperanza	33°34'39"S 58° 6'36"W	19,5	5,53	4,75	4,71	5,41
Palmar	33° 2'1"S 57°24'17"W	9	sd	sd	3,1	5
Villa Maruca	33°25'33"S 58°10'45"W	11,1	sd	sd	4,4	12,2

### **6.2. ANEXO 2: CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERÍODO DE DESARROLLO DEL CULTIVO EN CADA SITIO EXPERIMENTAL**

Entre paréntesis se indica la Ciudad más próxima a la cual hace referencia los datos climáticos y el año en el cual se desarrolló el experimento. Datos proporcionados por Dirección Nacional de Meteorología.

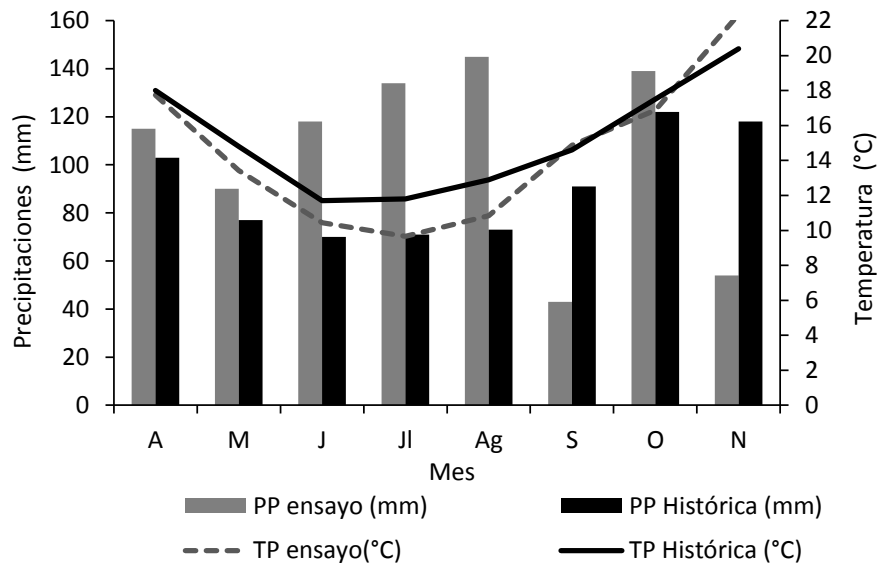
#### **6.2.1. El Puntal y La Esperanza (Dolores, 2010)**



PP: Precipitaciones acumuladas mensuales, TP: Temperatura promedio

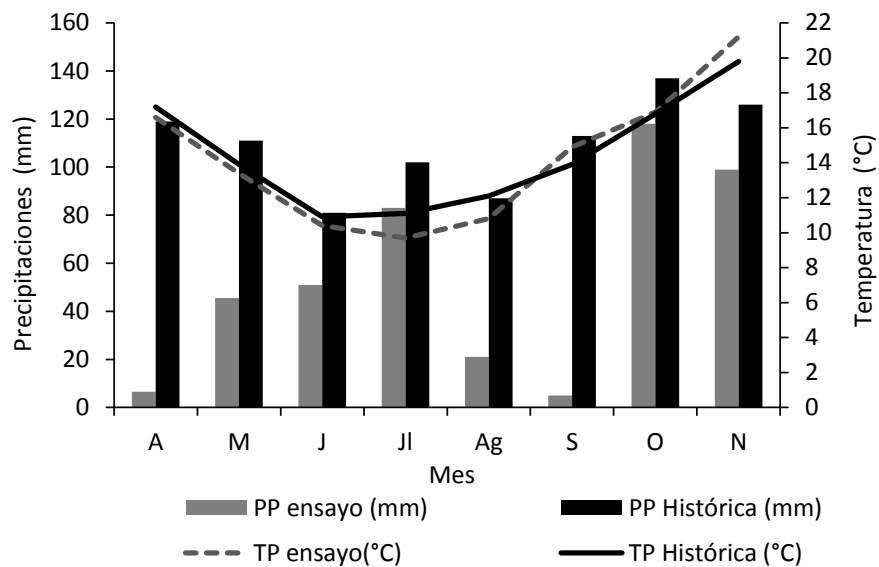
Nota: La TP del ensayo corresponde a la estación meteorológica de Mercedes

### 6.2.2. El Palmar (Young, 2011)



PP: Precipitaciones acumuladas mensuales, TP: Temperatura promedio.  
 Nota: La TP histórica corresponde a la estación meteorológica de Paysandú.

### 6.2.3. Villa Maruca (Dolores, 2011)



PP: Precipitaciones acumuladas mensuales, TP: Temperatura promedio.